

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**ICNOFÓSILES DEL PALEÓGENO EN EL NORESTE
DE MÉXICO**

**PRESENTA
MARÍA ISABEL HERNÁNDEZ OCAÑA**

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN GEOCIENCIAS**

AGOSTO, 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS

ICNOFÓSILES DEL PALEÓGEONO EN EL NORESTE DE MÉXICO

ELABORADA POR
MARÍA ISABEL HERNÁNDEZ OCAÑA

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN
EN GEOCIENCIA

Vo. Bo.

DIRECTOR DE TITULACIÓN

DRA. ELIZABETH CHACÓN BACA
DIRECTORA DE TESIS

DRA. SARA ALICIA QUIROZ BARROSO
CO-DIRECTORA DE TESIS

Linares, Nuevo León, México

Agosto de 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



LA TESIS

ICNOFÓSILES DEL PALEÓGENO EN EL NORESTE DE MÉXICO

ELABORADA POR

MARÍA ISABEL HERNÁNDEZ OCAÑA

**HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
GEOCIENCIAS**

**VO. BO.
COMITÉ DE REVISIÓN DE TESIS**

DRA. ELIZABETH CHACÓN BACA

DRA. SARA ALICIA QUIROZ BARROSO

DR. GABRIEL CHÁVEZ CABELLO

DRA. ROSALÍA GUERRERO ARENAS

DR. CESÁR FRANCISCO RAMÍREZ

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

AGOSTO 2019

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ciencias de la Tierra, donde realicé mis estudios de doctorado.

Al Museo de Paleontología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México por las facilidades otorgadas para realizar mi estancia de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico a través de la beca de manutención otorgada durante mis estudios de doctorado.

A mi directora de tesis, Dra. Elizabeth Chacón Baca, **por su inmenso apoyo** durante mi estancia en la Facultad de Ciencias de la Tierra, por sus valiosas enseñanzas académicas y de vida. Y por los apoyos económicos para la asistencia a la Convención Geológica Nacional 2019.

A mi co-directora de tesis, Dra. Sara Alicia Quiroz Barroso, por todas tus enseñanzas desde mis estudios de licenciatura, por compartir su conocimiento y por seguir formándome en el ámbito de la paleontología e icnología.

A los miembros del comité examinador Dr. Gabriel Chávez Cabello, Dra. Rosalía Guerrero Arenas y Dr. Cesar Francisco Ramírez Peña por sus aportaciones, comentarios y sugerencias acertadas que ayudaron a mejorar este trabajo.

Al director de la Facultad de Ciencias de la Tierra/UANL, Dr. Sostenes Méndez Delgado, por su apoyo en los tramites internos de la facultad y por las facilidades otorgadas para las salidas a campo.

Al subdirector de la Facultad de Ciencias de la Tierra/UANL, Dr. Gabriel Chávez-Cabello, por su apoyo en la logística de las salidas a campo.

Al Dr. Carlos Gilberto Aguilar Madera, sub-director de posgrado de la Facultad de Ciencias de la Tierra/UANL. A Karla Casas Peña, secretaria del posgrado, por la gran ayuda en logística administrativa.

Al Ing. Samuel Eguiluz de Antuñano, por su ayuda, apoyo y sus enseñanzas en el campo del estudio de la Cuenca de Burgos y por la bibliografía compartida, sobre todo por su apoyo moral en situaciones complicadas.

Al Dr. Eduardo Mayoral Alfaro del Departamento de Ciencias de la Tierra, de la Universidad de Huelva, España, por ayuda y asesoría en la determinación del material icnológico y por sus

acertadas y oportunas opiniones en las cuestiones icnológicas, que indudablemente enriquecieron este trabajo.

Al Dr. Felipe de Jesús Torres de la Cruz, por toda su asesoría y apoyo en la geología y trabajo de campo, por sus valiosas sugerencias y aportaciones, las cuales ayudaron sin duda a mejorar y enriquecer esta tesis.

Al personal del Laboratorio de Preparación de la Facultad de Ciencias de la Tierra por su apoyo en la elaboración de los cortes de muestras y elaboración de las láminas delgadas.

Al comité organizador del Simposio Latinoamericano de Icnología (SLIc), por su apoyo económico a para asistir a dicha reunión en Santa Martha, Colombia en octubre de 2018.

Al M. en C. Daniel Navarro Santillán por su asistencia técnica en el trabajo curatorial del material depositado en el Museo de Paleontología de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

A la Quím. Blanca Sonia Angeles García, técnico académico del Instituto de Geología de la UNAM, por abrirnos las puertas al uso del microscopio electrónico.

A Jaime Morin, por las facilidades otorgadas en el acceso a las localidades del Rebaje.

DEDICATORIA

A mis padres por ser mi guía en esta vida y en este mundo, simplemente sin ellos no sería lo que soy. A mis hermanas por ser unas verdaderas amigas y por todo su amor compartido. A ustedes por apoyarme en todo momento.

A la familia Torres de la Cruz, por abrirme las puertas de su casa y por todas sus atenciones durante esta etapa.

A mis amigos María, Axel, Berenice, Alfredo, Gabriela, Itzia, Daniel y Sergio, aunque ya casi no nos veamos el poco tiempo que compartimos siempre es lo mejor Los quiero.

A Felipe, por compartir conmigo esta etapa de nuestras vidas llamada “doctorado”. Mil gracias por todo.

Por este conducto declaro bajo protesta, que este trabajo lo he desarrollado personalmente, con el apoyo del Comité de Titulación. Toda información utilizada de la literatura ha sido citada debidamente.

María Isabel Hernández Ocaña

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XII
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Justificación	3
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivo.....	4
1.4.1 Metas Académicas.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
GEOLOGÍA REGIONAL	5
2.1 Antecedentes de la Cuenca de Burgos (CB)	6
2.2 Marco geológico regional	6
2.3 Evolución Tectónica y sedimentaria	8
2.3.1 Basamento (Paleozoico y Jurásico medio)	8
2.3.2 Cubierta sedimentaria en el Cretácico	9
2.3.3 Cubierta sedimentaria durante el Cenozoico	9
2.4 Geología Local.....	11
2.4.1 Formación Midway (FM).....	12
2.4.2 Formación Wilcox (FW).....	13
2.4.3 Formación Reklaw (FR).....	15
2.4.5 Formación Queen City (FQc)	17
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	19
3.1 Trabajo de campo.....	20
3.2 Muestreo	21
3.3 Columnas estratigráficas	21
3.4 Litofacies.....	23
3.5 Icnotaxonomía.....	23
3.6 Tafonomía	25
3.7 Análisis petrográfico	25

CAPÍTULO 4 RESULTADOS	27
4.1 Introducción	28
4.2 El Rebaje	28
4.2.1 Litofacies y petrografía	29
4.2.2 Análisis paleontológico y de <i>Venericardia</i>	33
4.2.3.1 Análisis tafonómico	35
4.3 San José de las Lajas	40
4.3.1 Litofacies y petrografía	41
4.4 La Curva	47
4.4.1 Litofacies y petrografía	47
4.5 La Presa	50
4.5.1 Litofacies y petrografía	51
4.6 Icnotaxonomía	56
Icnogénero <i>Arenicolites</i> Salter 1857	57
Icnogénero <i>Chondrites</i> von Stenberg, 1833	58
Icnogénero <i>Diplocraterion</i>	62
Icnogénero <i>Lockeia</i> James 1879	65
Icnogénero <i>Rosselia</i> Dahmer, 1937	66
Icnogénero <i>Ophiomorpha</i> Lundgren, 1891	69
Icnogénero <i>Paleophycus</i> Hall, 1847	79
Icnogénero <i>Planolites</i> Nicholson, 1893	80
Icnogénero <i>Psilonichnus</i> , Fürsich, 1981	82
Icnogénero <i>Protovirgularia</i> McCoy 1850	85
Icnogénero <i>Sinusichnus</i> Gibert, 1996	86
Icnogénero <i>Skolithos</i> Haldeman, 1840	91
Icnogénero <i>Thalassinoides</i> Ehrenberg, 1944	94
CAPÍTULO 5	96
DISCUSIÓN	96
5.1 Distribución de las trazas fósiles	97
5.2 Consideraciones paleoambientales	101
5.2.1 El Rebaje	101
5.2.2 San José de las Lajas	105
5.2.3 La Curva	107

5.2.4 La Presa (Formación Reklaw).....	108
5.3 Generalidades.....	110
CONCLUSIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	116
APÉNDICE 1. MARCO TEORICO DE LAS TRAZAS FÓSILES.....	130
Características de las trazas fósiles.	130
Clasificaciones	132
Icnofacies	134
APÉNDICE 2. ANÁLISIS COMPOSICIONAL DE LAS ARENISCAS.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Altos estructurales que rodean a la Cuenca de Burgos: (a) Sierra Burro-Picachos, (b) Sierra de San Carlos, (c) Anticlinal Huizachal-Peregrina, (d) Sierra Madre Oriental. El mapa se realizó con datos vectoriales del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y de la CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos).....	7
Figura 2. Provincia de la Cuenca de Burgos, en donde se muestra la distribución crono-estratigráfica de las franjas que la componen (Modificado de Echánove, 1986).	10
Figura 3. Secuencia estratigráfica cenozoica, marcando los ciclos transgresivos y regresivos en la Cuenca de Burgos (Modificado de Echánove, 1986 y CNH, 2018). Las edades fueron tomadas a partir de Eguiluz de Antuñano (2011a).....	11
Figura 4. (A) Limolitas calcáreas de la Formación Midway. (B) Concreciones septarias. Ambos afloramientos en el río San Juan, en el Municipio Los Herreras, N.L., (Coordenadas: 25°53'56" N/99°23'59" O).....	12
Figura 5. Mapa paleogeográfico de la distribución de las barras arenosas durante el depósito de la FW (Modificado de Galloway <i>et al.</i> , 2000).	14
Figura 6. (A) Afloramientos de la FW en el municipio de China. (B) Afloramiento de la FW en Los Herreras, (Coordenadas 25°57'50.79"N, 99°19'53.62"O).....	15
Figura 7. Mapa general de ubicación de las localidades estudiadas	20
Figura 8. Simbología utilizada en las columnas estratigráficas.	22
Figura 9. Clasificación textural y composicional de Folk <i>et al.</i> (1970).....	26
Figura 10. (A) Columna estratigráfica interpretativa. (B) Perfil topográfico esquemático (la escala horizontal no corresponde con la vertical), los horizontes tienen un buzamiento de 10° a 20° exagerados en el esquema. (C) Mapa de ubicación. (D) Corte de la carretera General Terán-China, con litología más fina que las capas superiores, correspondientes a la FW parte basal de El Rebaje.	29
Figura 11. Microfotografías de la facies. (A) Arenisca fina con cuarzo (Qz), y con bioturbación (Bt), y en menor proporción con minerales opacos (Mp). (B) Muestra teñida con rojo de alizarina donde los granos se ven con más detalle.	30
Figura 12. Rancho Chirinos, Lámina MD (A) Arenisca, con abundantes bioclastos: bivalvos (Bv), gasterópodos (Gr); con cuarzos (Qz) y feldespatos flotando en la matriz, y escasas micas (M). (B) Arenisca con gasterópodos (Gr), bivalvos (Bv) y cristales de cuarzo (Qz). (C) Arenisca con bivalvos (Bv), cristales de glauconita (Gn), y cuarzo (Qz). (D) Arenisca con abundantes bivalvos (Bv) y escasos foraminíferos (Fr).....	31
Figura 13. Microfotografías de la facies G, Arfb, en el Rancho El 7. (A) Arenisca fina con foraminíferos del género <i>Discocyclina</i> (Frg). (B) Algas (Alg) y fragmentos de briozoos (Br). (C) Arenisca fina con restos de bivalvos (Bv) y pellets (pll). (D) Arenisca arcillosa con restos de bivalvos y abundantes pellets.....	32

Figura 14. <i>Venericardia (Venericor) zapatai</i> . (A, C) Vista exterior de la valva izquierda. (B) Vista exterior de la valva derecha. (D) Valva juvenil izquierda, con las costillas bien marcadas. (E) Vista interior de la valva derecha. Escala=2 cm.	34
Figura 15. (A) Bioclastos en sección transversal. (B) Sección transversal de un estrato (las flechas y la línea punteada indica la orientación de las valvas). (C) Concentración de conchas con variación en el tamaño (línea amarilla). (D) Valvas de <i>Venericardia</i> en la superficie del estrato (con orientación bimodal).	36
Figura 16. (A) Concentraciones de <i>Venericardia</i> en posición convexa hacia abajo y hacia arriba. (B) Esquema de la posición de las conchas dentro del estrato. (C) Valvas en vista de planta con orientación bimodal. (D) Limite entre las concentraciones (línea punteada amarilla y trazas fósiles indeterminadas (flecha roja). (E) Bioclastos en posición caótica.	37
Figura 17. (A-C) Microestructura de las conchas de <i>Venericardia</i> , con el mismo tipo de sedimento relleno del que las rodea. (D) Microestructura original, con las capas bien diferenciadas. (E) Relleno de sedimento fino, con foraminíferos del género <i>Globorotalia</i> (Flecha roja). (F) Relleno de sedimento fino con zonas oxidadas (Flecha roja). (G) Corte transversal de una concha completa de <i>Venericardia</i> (ambas valvas), con relleno muy fino de arenisca. (H) Corte transversal de una concha completa de <i>Venericardia</i> (ambas valvas), con relleno fino (hacia la derecha) y relleno de otros bioclastos (izquierda).	39
Figura 18. (A) Ubicación geográfica del área de estudio, en el Municipio de los Herreras. (B) Vista panorámica de la localidad, la línea punteada y flecha amarilla marcan la posición de los estratos a nivel del suelo. (C) Columna estratigráfica, localidad San José de las Lajas, se señalan los niveles con contenido fósil (tanto trazas fósiles como restos de fósiles) y abundancia relativa.	40
Figura 19. Facies G, Arb: (A-D) Valvas desarticuladas de <i>Venericardia</i> , en posición cóncava y convexa, en la figura D, se aprecia que el sedimento relleno de las valvas es más fino que la matriz. Lámina delgada SJL-1. (B) Arenisca fina a muy fina, con abundantes bioclastos: gasterópodos (Gr), restos de bivalvos (Bv); con cristales de cuarzo angulosos (Qz). (C) Bioclastos: gasterópodos (Gr), restos de bivalvos (Bv) y escasos briozoos (Bzoo); y con cristales de cuarzo mal seleccionados y angulosos (Qz).	42
Figura 20. Facies B, Lf-Arf: (A) Capas heterolíticas de lutita y arenisca (la línea punteada indica los estratos de arenisca). (B) Acercamiento de un estrato de arenisca con <i>Skolithos</i> isp. (Flecha amarilla), (escala del lápiz=10 cm).	43
Figura 21. Corte transversal y muestra de mano correspondiente a las Facies C, Arf 1. (A) Facies C, Arf, con laminación muy fina y ligeramente ondulada (línea punteada), en la superficie se conservan trazas fósiles como <i>Planolites</i> isp. (Flecha blanca). (B) Vista de planta con estructuras deformadas. Lámina delgada SJ1, (C) Acercamiento a la lámina con nicoles paralelos (D) Misma sección con nicoles cruzados, se observan minerales como: cuarzo (Qz), feldespatos (Ft), plagioclasa (Pg) y micas (Mv) con contactos puntuales (flecha rosa) y longitudinales (flecha roja).	44

Figura 22. Corte transversal correspondientes a la Subfacies C, Arf 1. (A) Corte con laminación bien definida y grietas de desecación (Flecha blanca) las líneas punteadas indican los sets de laminación, los círculos indican las trazas fósiles. Lámina delgada SJL-5, (B) Arenisca con laminación bien definida y con nicoles paralelos; la zona más oscura está compuesta por arcillas (Ar), mientras que la zona clara cristales de cuarzo (Qz) (C) Acercamiento de la lámina con nicoles paralelos, en donde se observan minerales opacos (Mn); cristales de cuarzo angulosos (Qz) y Moscovita (Mv) entre los cristales de cuarzo. (D) Misma sección con nicoles cruzados, donde se distinguen los cuarzos de los feldespatos (Ft). 45

Figura 23. (A) Corte transversal de una muestra de mano de la litofacies Arf-m, con ondulitas simétricas en la superficie (línea punteada blanca). Lámina delgada R6, (B) Lámina con nicoles paralelos, se observan los diversos componentes, cuarzo (Qz), feldespatos (Ft), Zr (circón), minerales opacos (Mo). (C) Misma sección con nicoles cruzados, donde se distinguen los cuarzos de los feldespatos (Ft) y con contactos longitudinales (flecha rosa). 46

Figura 24. (A) Ubicación geográfica de la localidad “La Curva”. (B) Vista panorámica del área (25°44'06.59" N 99°20'33.99" O). (C) Sección estratigráfica de “La Curva”. 47

Figura 25. Imágenes de campo de la facies B, LfArF. (A) Intercalaciones de lutita y arenisca (la línea punteada indica los paquetes de arenisca con HCS y SCS. (B) Acercamiento de un estrato de arenisca con HCS y el límite con las capas de limolitas (Escala de la pluma 10 cm). (C) Paquete de 50 cm de espesor con HCS (flecha blanca) con capas de limolitas en la parte superior. (D) Acercamiento de la estratificación HCS y SCS (Escala=8 cm) 48

Figura 26. Imágenes de campo de la Facies G, Amv. (A) Estrato masivo de arenisca. (B) Acercamiento de la parte basal de la facies, con abundantes restos de plantas. (C) Estratos de arenisca con estratificación ondulada y con ondulitas en la superficie (D) Ejemplares de campo de *Ophiomorpha* isp., dentro de la facies D, Arf-m..... 49

Figura 27. Lámina LC. (A) Lámina con nicoles paralelos, se observan los diversos componentes, cuarzo (Qz), feldespatos (Ft), moscovita (Mv). (B) Misma sección con nicoles cruzados, donde se distinguen los cuarzos de los feldespatos (Ft) y con contactos longitudinales..... 50

Figura 28. (A) Localización del área de estudio. (B) Vista panorámica de la sección medida. (C) Columna estratigráfica, sección La Presa, se señalan los niveles con contenido fósil (tanto trazas fósiles como restos de fósiles) abundancia relativa e índice de bioturbación. El significado de la litología se encuentra en la figura 8 del capítulo 4. 51

Figura 29. Litofacies LArf, (A) Vista panorámica de la parte inferior de la sección medida, la flecha roja indica el espesor de las capas de arenisca que van aumentando de espesor de la base hacia la superficie. (B) Detalle de las intercalaciones de lutita con pequeñas capas de arenisca, algunas se presentan como lentes (Línea punteada blanca). 52

Figura 30. (A) Vista panorámica de donde se ubica la facies D, Arf-m. (B) Intercalaciones de arenisca y capas de limolitas con un contacto neto (Línea punteada blanca). (C) Estratificación interna ondulada (flechas blancas), por debajo hay lutitas (la línea punteada roja indica este cambio). (D) Capa de arenisca con estratificación cruzada de bajo ángulo (las líneas punteadas indican la inclinación de la estratificación). 53

Figura 31. Litofacies ArF. (A) Ondulitas simétricas en la superficie del estrato, se localizan en el nivel 5 del afloramiento. (B) Corte transversal de una capa con trazas fósiles dentro de ella (Flechas blancas). (C) Ondulitas simétricas en el techo de la sección que van cambiando a ondulitas de interferencia (recuadro rojo).....	54
Figura 32. Láminas delgadas correspondientes a las litofacies Arf-m y ArF. (A) Lámina Bg 2, sección con nicoles cruzados donde se diferencian los feldespatos (Ft) de los cuarzos, hay presencia de glauconita (Gl) se observan contactos puntuales y con clastos angulosos. (B) Lámina Bg 1, Sección con nicoles cruzados, donde los granos son más pequeños, presenta cuarzo (Qz) y feldespatos (Ft) principalmente.....	55
Figura 33. (A) <i>Arenicolites</i> isp. (Ar); (B) Esquema de <i>Arenicolites</i> isp. y su preservación dentro del sustrato.	58
Figura 34. <i>Chondrites</i> cf. <i>intricatus</i> en El Rebaje. (A) <i>Chondrites</i> cf. <i>intricatus</i> , preservado en la base del estrato y en arenisca, se observan las ramificaciones típicas del icnogénero. (B) Esquema de <i>C. cf. intricatus</i> y su modo de preservación. (C) <i>C. cf. intricatus</i> con las galerías encimadas unas sobre otras. (D) Posición de <i>C. cf. intricatus</i> dentro del sustrato.	60
Figura 35. <i>Chondrites</i> de la Localidad San José de las Lajas (A) <i>Chondrites targonii</i> , mal preservado, se observa ligeramente el relleno de la traza. (B) <i>Chondrites targonii</i> , se conserva sobre la base del estrato, se aprecia con detalle la ligera curvatura de las ramificaciones. (C) <i>Chondrites</i> cf. <i>intricatus</i> . (D) <i>Chondrites targonii</i> y <i>Chondrites</i> cf. <i>intricatus</i> y su posición dentro del sustrato.	62
Figura 36. (A) Galerías de <i>Diplocraterion</i> isp (<i>Dp</i>). en posición vertical, el <i>spreite</i> ligeramente se observa. (B-C) <i>Diplocraterion</i> isp. (<i>Dp</i>), en vista de planta, se observa con claridad las aperturas (Flecha blanca). (D) Representación esquemática de <i>Diplocraterion</i> isp. dentro del sustrato. Galerías en “La Curva” (E) <i>Diplocraterion</i> isp. (<i>Dp</i>) en posición vertical y conservada en relieve completo. (F) Galerías pequeñas de <i>Diplocraterion</i> isp., conservadas en epirrelieve.....	64
Figura 37. (C) <i>Lockeia</i> isp. (Lk) y <i>Protovirgularia dichotoma</i> (Pr); (D) Esquema de <i>Lockeia</i> isp y <i>Protovirgularia dichotoma</i> . y posición dentro del sustrato.	66
Figura 38. Trazas de <i>Rosselia</i> . (A) <i>Rosselia</i> isp., en corte transversal donde se muestra el relleno más fino que la roca hospedante. (B) Esquema de <i>Rosselia</i> isp. y su posición dentro del sustrato. (C) Vista de planta de <i>Rosselia</i> isp. (D) <i>Rosselia</i> isp. en corte transversal y su posible relación con <i>Skolithos linearis</i> . (F-G) <i>Rosselia</i> isp. con diferentes modos de preservación.	68
Figura 39. (C) <i>Ophiomorpha nodosa</i> con los pellets bien conservados (D) Esquema de <i>Ophiomorpha nodosa</i> dentro del sustrato.	70
Figura 40. (A) <i>Ophiomorpha</i> cf. <i>nodosa</i> , preservado dentro del estrato. (B) Esquema de <i>O. cf. nodosa</i> y su modo de preservación. (C) Galerías <i>O. cf. nodosa</i> , en posición horizontal. (D) <i>O. cf. nodosa</i> y su posición dentro del sustrato.	72
Figura 41. Trazas asignadas a <i>Ophiomorpha</i> isp. (morfotipo 1). (A) Traza dentro del sustrato y con bifurcación. (B y D) Posición de <i>Ophiomorpha</i> dentro del sustrato. (C) <i>Ophiomorpha</i> con relleno de sedimento fino que le da apariencia de un <i>spreite</i>	74

Figura 42. (A- B) <i>Ophiomorpha</i> isp, (<i>Oph</i>) con los pellets mal conservados y dentro de una matriz de arenisca laminar, nivel 1. (C) <i>Ophiomorpha</i> isp. (<i>Oph</i>) donde solo se conservan moldes de la pared pelletoidal, nivel 6. (D) Modo de preservación de <i>Ophiomorpha</i> isp. (<i>Oph</i>) dentro del sustrato.	76
Figura 43. Galerías de <i>Ophiomorpha</i> isp. (A) <i>Ophiomorpha</i> isp. (<i>Oph</i>), con bifurcación en la superficie de la traza. (B-D) Galería de <i>Ophiomorpha</i> isp. dentro del sustrato. (C) <i>Ophiomorpha</i> isp. (<i>Oph</i>), en posición horizontal.....	78
Figura 44. Trazas asignadas a <i>Planolites</i> isp. (A-B) <i>Planolites</i> isp. (<i>Pt</i>) conservado en arenisca fina. (C) Estructuras biodeformacionales (moteados) de <i>Planolites</i> isp. (<i>Pt</i>) dentro del estrato, se observa como las galerías interrumpen la laminación. (D) Representación esquemática de <i>Planolites</i> isp. y su posición dentro del sustrato.	82
Figura 45. (A, C y D) Ejemplares de <i>Psilonichnus</i> isp., en donde se nota con claridad el ensanchamiento en la ramificación. (B) <i>Skolithos linearis</i> . (E) <i>Palaeophycus</i> isp. (F) Diagrama esquemático de la posición de las trazas fósiles (<i>Paleophycus</i> isp., <i>Psilonichnus</i> isp. y <i>Skolithos linearis</i>).	84
Figura 46. (A) <i>Protovirgularia dichotoma</i> (<i>Pr</i>), asociado con <i>Skolithos</i> isp (<i>Sk</i>) y <i>Rosselia</i> isp. (<i>Rs</i>) (B) Esquema de <i>Protovirgularia dichotoma</i> , y su posición dentro del sustrato	86
Figura 47. <i>Sinusichnus sinuosus</i> en la localidad San José de las Lajas. (A) Densa población de <i>S. sinuosus</i> (<i>Sn</i>), el tamaño de las galerías es grande y se preserva en la superficie del estrato, se observan los puntos de ramificación (flecha amarilla, la escala de la barra azul es de 13 cm). (B) Parámetros geométricos de <i>Sinusichnus</i> . (C) <i>S. sinuosus</i> (<i>Sn</i>) con ramificaciones irregulares. (D) <i>S. sinuosus</i> (<i>Sn</i>), de tamaño pequeño y conservado sobre ripples.	88
Figura 48. Trazas asignadas a <i>Sinusichnus sinuosus</i> . (A). <i>S. sinuosus</i> con ramificaciones en forma de H y en posición horizontal. (B) Posición dentro del sustrato de <i>S. sinuosus</i> . (C) <i>S. sinuosus</i> , más angostas y en forma de espiral. (D y E) <i>S. sinuosus</i> , sin ramificaciones. Todas estas trazas se conservan en epirrelieve.	90
Figura 49. (A) <i>Skolithos linearis</i> (<i>Sk</i>), conservada en una matriz de arenisca media a fina. (B) Representación de <i>Skolithos linearis</i> dentro del sustrato. (C) <i>Skolithos linearis</i> (<i>Sk</i>) conservada en una matriz de arenisca fina y con laminación interna.	92
Figura 50. Trazas asignadas a <i>Skolithos</i> isp (<i>Sk</i>). (A-B) <i>Skolithos</i> isp. conservado en relieve completo, se observa que son trazas muy tenues.	93
Figura 51. Galerías de <i>Thalassinoides</i> isp. (A) <i>Thalassinoides</i> isp (<i>Th</i>), con ramificaciones pobremente preservadas. (B) <i>Thalassinoides</i> isp. (<i>Th</i>), con mala preservación.	95
Figura 52. Reconstrucción paleoambiental de los hábitos de vida de una comunidad marina de invertebrados durante el Cenozoico. 1) <i>Venericardia</i> ; 2) <i>Chama squamosa</i> ; 3) <i>Turbinolia</i> ; 4) <i>Conus scrabacula</i> ; 5) <i>Turritella imbricataria</i> ; 6) <i>Nucula similis</i> ; 7) <i>Glycymeris deletus</i> ; (Esquema modificado de McKerrow, 1978).	102
Figura 53. Modelo de depósito propuesto para la localidad El Rebaje.	104
Figura 54. Esquema generalizado del avance de la línea de costa durante el intervalo Paleoceno-Eoceno.	112

Figura 55. Toponimia de las trazas fósiles, esquema realizado a partir de Seilacher (1953) y Martinsson (1970). Tomado Rindsberg (2012).	132
Figura 56. Categorías etológicas de las trazas fósiles. Tomado de Buatois y Mángano, 2011. .	134
Figura 57. Esquema ilustrativo de las principales icnofacies de invertebrados. Las icnofacies individuales indican las condiciones y el ambiente de depósito. Modificado de Buatois y Mángano, 2011.	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Facies identificadas.....	23
Tabla 2. Índice de bioturbación (Tomado y modificado de Taylor y Goldring, 1993).	24
Tabla 3. Medidas de <i>Venericardia (venericor) zapatai</i> (en mm).	33
Tabla 4. Distribución y abundancia relativa de las trazas fósiles en las localidades de estudio. ER (El Rebaje); SJL (San José de las Lajas); LC (La Curva); LP (La Presa).	56
Tabla 5. <i>Tiering</i> , estrategias de comportamiento y categorías arquitecturales de los icnotaxones reportados en este trabajo.....	100
Tabla 6. Principales características de las trazas fósiles (Buatois y Mángano 2008, 2011; Minter <i>et al.</i> 2016).	131
Tabla 7. Clasificación de Icnofacies y las condiciones paleoambientales en las que se forman cada una de ellas.	136

RESUMEN

Se presenta el análisis icnológico y paleoambiental de cuatro localidades ubicadas dentro de la Cuenca de Burgos en el noreste de México (El Rebaje, San José de las Lajas, La Curva y La Presa). Se identificaron trece icnogéneros: *Arenicolites*, *Chondrites*, *Diplocraterion*, *Lockeia*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Protovirgularia*, *Psilonichnus*, *Rosselia* isp., *Sinusichnus*, *Skolithos* y *Thalassinoides*. Cinco icnoespecies: *Chondrites targonii*, *Ophiomorpha nodosa*, *Protovirgularia dichotoma*, *Sinusichnus sinuosus* y *Skolithos linearis* y dos icnoespecies tentativamente asignados a *Chondrites* cf. *intricatus* y *Ophiomorpha* cf. *nodosa*. Estas se encuentran asociadas con estructuras sedimentarias como estratificación cruzada, laminar, *hummocky*, *ripples* simétricas y de interferencia y estructuras de carga. También se identificaron capas de concentraciones de moluscos del género *Venericardia* en las localidades el Rebaje y San José de las Lajas, se relacionan con condiciones de tempestitas proximales y distales respectivamente. El ambiente de depósito para estas localidades varía desde shoreface transicional hacia el *offshore* para El Rebaje, San José de las Lajas y la Curva, que se determinaron como parte de la Formación Wilcox (Thanetiano-Ypresiano) hasta zonas de *foreshore* y *backshore* para la localidad La Presa como parte de la Formación Reklaw (Ypresiano-Lutetiano). Estas variaciones coinciden con la regresión generalizada de la zona costera que ha sido reportada en estudios previos para la Cuenca de Burgos y que ocurrió en el Paleógeno-Neógeno.

ABSTRACT

It is presented the iconological and paleoenvironmental analysis of four localities that are exposed in the Burgos Basin, northeast of Mexico (El Rebaje, San José de las Lajas, la Curva y La Presa). There were determined thirteen ichnogenera: *Arenicolites*, *Chondrites*, *Diplocraterion*, *Lockeia*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Protovirgularia*, *Psilonichnus*, *Rosselia*, *Sinusichnus*, *Skolithos*, and *Thalassinoides*. Five ichnospecies: *Chondrites targonii*, *Ophiomorpha nodosa*, *Protovirgularia dichotoma*, *Sinusichnus sinuosus* and *Skolithos linearis* as well as two ichnospecies tentatively assigned to *Chondrites* cf. *intricatus* and *Ophiomorpha* cf. *nodosa*. These are associated with sedimentary structures like cross-stratification, lamination, hummocky stratification, symmetric and interference ripples, and load structures. There were identified shell beds from the genus *Venericardia* in El Rebaje and San José de las Lajas localities in proximal and distal tempestites zone, respectively. The depositional environment of the Wilcox Formation (Thanetian-Ypresian) fluctuates from transitional shoreface to offshore (El Rebaje, San José de las Lajas, and La Curva) meanwhile for the Reklaw Formation (Ypresian-de tian) it varies from foreshore to backshore (La Presa). These variations match with a generalized regression on the coastal zone during Paleogene-Neogene that has been reported in previous studies in the Burgos Basin.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción

La Cuenca de Burgos es una cuenca de antepaís del Paleógeno en México que representa la extensión sur de la cuenca del Río Grande de Texas (Bryant *et al.*, 1991). Se localiza en el margen noreste de la República Mexicana y colinda al norte con Estados Unidos, cubriendo principalmente al estado de Tamaulipas y parcialmente a Nuevo León y el margen noreste de Coahuila.

Esta es una zona de interés en la industria petrolera por su potencial gasífero, debido a esto la mayoría de los trabajos realizados en el área se centran en estudios de carácter geológico-estructural y geofísico por parte de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y empresas privadas, en donde la mayor parte de información se encuentra en reportes internos e inéditos, restringidos en su mayor parte. Estos estudios están enfocados principalmente en la interpretación sísmica y la productividad de los pozos, por ende, la determinación de ambientes sedimentarios se ha realizado mediante el análisis de registros geofísicos y de núcleos del subsuelo, en donde el objetivo principal ha sido la caracterización de intervalos con potencial de producir hidrocarburos.

Los análisis paleoambientales realizados en la Cuenca de Burgos no han contemplado el desarrollo de asociaciones icnofosilíferas, no obstante que éstas representan indicadores paleoambientales de alta resolución en ambientes continentales, mixtos y marinos. En el mismo sentido, su presencia contribuye de manera significativa al ámbito de la geología de exploración, ya sea en la evaluación del ambiente de depósito y la identificación de superficies estratigráficas, y/o, aportando información importante para el desarrollo de modelos geológicos utilizados en la determinación de rocas productoras (Gingras *et al.*, 2015).

En el mismo contexto, la importancia paleoambiental de los icnofósiles radica en reconocer a las icnofacies (Krapovickas, 2010). Una icnofacies consiste en una asociación de trazas fósiles que se repite en el tiempo geológico cuando las condiciones ambientales también lo hacen, por lo que tiene un carácter recurrente; también se trata de agrupaciones de estructuras biogénicas que reflejan la respuesta de los animales, también llamado etología, a las condiciones ambientales (MacEachern *et al.*, 2007 a; Buatois y Mángano, 2011).

Originalmente se consideró que las icnofacies marinas son indicadoras de batimetría (Seilacher, 1967), pero esto no siempre se cumple necesariamente (Crimes, 1977; Seilacher, 1978; Pemberton y Frey, 1984; Carmona *et al.*, 2008), ya que los principales controles en la

distribución de icnofacies incluyen: tipo de sustrato, energía, contenido de nutrientes, oxigenación, salinidad, tasas de sedimentación y erosión, siendo la batimetría un control de segundo orden (de Gibert y Martinell, 1998; Buatois y Mángano, 2008). Así que, se deben considerar todos los datos posibles tanto sedimentológicos como de los icnogéneros más representativos, pues la gama ambiental de algunas trazas fósiles puede cambiar a través del tiempo, por ejemplo, la migración de las trazas en ambientes marinos someros a ambientes profundos y viceversa (Crimes y Fedonkin, 1994; Olivero y Gaillard, 1996; Olivero, 2003).

Por consiguiente, pueden ser considerados como una herramienta en estudios integrales de ambientes sedimentarios, ya que concentra las características de un ambiente de depósito. De igual manera, son una herramienta en la estratigrafía genética ya que, en algunas ocasiones, las discordancias vienen asociadas a un conjunto de icnofósiles, donde los organismos que dejan esas trazas responden a los cambios sedimentológicos produciendo icnofacies sustrato-controladas (Pemberton *et al.*, 2000).

1.2 Justificación

En la Cuenca de Burgos la presencia de afloramientos es escasa y los rasgos geológicos superficiales se encuentran cubiertos por sedimentos cuaternarios; por ello, los estudios geológicos se basan de manera general en información proveniente de pozos y correlaciones con estudios en Texas; sin embargo, el área de los municipios de China y Los Herreras, en el estado de Nuevo León, presentan afloramientos en superficie del Paleoceno y Eoceno que ayudarán a comprender el desarrollo de ambientes sedimentarios mixtos desde un punto de vista icnofosilífero, representando una nueva contribución al conocimiento paleontológico e icnológico del noreste de México, pudiéndose resaltar la importancia que los icnofósiles brindan en la evolución e interpretación paleoecológica y paleoambiental a detalle.

1.3 Hipótesis

El estudio de las asociaciones icnofosilíferas e icnofacies, junto con análisis petrográfico y tafonómico, permitiría reconocer con mayor resolución los cambios sedimentarios y paleoambientales en la Formación Wilcox y Reklaw, debido a que los organismos productores de

trazas fósiles son muy sensibles a los cambios ambientales, cambios sedimentológicos pueden dar indicios de cambios geológicos (tasa de sedimentación, nivel del mar) y que ocurren en una superficie de depósito. Es decir, las litofacies observadas en el área de estudio efectivamente pueden corresponder a cambios en la icnofauna.

1.4 Objetivo

Realizar un análisis de icnofacies en el área sur de la Cuenca de Burgos en rocas siliciclásticas depositadas durante el Paleógeno, para determinar facies sedimentarias y su relación con parámetros ambientales (fluctuaciones del nivel del mar, oxigenación, disponibilidad de nutrientes etc.), asociando estos parámetros a las condiciones paleoambientales previamente reportadas en el área.

1.4.1 Metas Académicas

- Realizar el estudio de icnología sistemática (descripción y determinación) y evaluar el rol biológico y de comportamiento de los organismos que realizaron las trazas fósiles en el área a estudiar.
- Determinar y analizar el grado de bioturbación presente con relación a la tasa de sedimentación.
- Establecer los factores involucrados que propiciaron la bioturbación en el ambiente de depósito.
- Determinar las icnofacies del área, así como, sus implicaciones paleoambientales.
- Elaborar las columnas estratigráficas de cada área.
- Realizar un análisis petrográfico de las facies más representativas identificadas en campo.

CAPÍTULO 2

GEOLOGÍA REGIONAL

2.1 Antecedentes de la Cuenca de Burgos (CB)

La exploración petrolera de la Cuenca de Burgos (CB) comenzó en las décadas de 1920 y 1930 por compañías extranjeras. El estado mexicano, a través de su paraestatal Petróleos Mexicanos (PEMEX), inició su exploración en 1936 y años más tarde se intensificó la actividad exploratoria, que se vio reflejada en el establecimiento de campos productores de gas (Echánove, 1986).

Se han realizado gran cantidad de estudios en esta zona, entre los cuales se incluyen tesis de maestría y doctorado de carácter inédito en donde resaltan estudios geológicos y geofísicos (Ortiz-Ubilla y Tolson, 2004). Uno de los estudios clave en la cuenca fue realizado por Echánove (1986); que estableció la geología y sedimentología de la CB de manera más puntual e interpretó de manera general los ambientes sedimentarios mixtos con potencial de explotación.

Sobre la evolución geológica del área, destaca el estudio realizado por Pérez-Cruz (1992), en el que se analizó la estratigrafía y geología estructural por medio de líneas sísmicas regionales y registros geofísicos de pozos.

Eguiluz de Antuñano (2004, 2009, 2011a, b), integró información sobre los conceptos geológicos más recientes del área apoyado con datos sísmicos y bioestratigráficos con fines en la exploración de hidrocarburos. De la misma manera se ha completado la información con trabajos donde refieren estas discordancias asociadas a los últimos eventos de la Orogenia Laramide durante el Paleógeno (Chávez-Cabello *et al.*, 2005; Eguiluz de Antuñano, 2011a).

2.2 Marco geológico regional

La CB comprende una amplia porción del noreste de México, abarcando en mayor proporción el estado de Tamaulipas, parcialmente a Nuevo León y el margen noreste de Coahuila (Echánove, 1986; Pérez-Cruz, 1993). Geológicamente abarca una porción extensa, en el área noroccidental del Golfo de México, denominada Embahiamiento del Rio Grande (*Rio Grande Embayment*) que se extiende desde el Sur de Estados Unidos hasta la parte noreste de México, mientras que su límite político se encuentra con la frontera sur de EE.UU. (Texas) (Ortiz-Ubilla, 2006). La CB tiene un bajo relieve inclinado hacia el oriente y es parte de la

Planicie Costera del Golfo de México y la plataforma continental de Tamaulipas (Pérez-Cruz, 1992).

Los altos estructurales que limitan a la CB son la Sierra Burro-Picachos, la Sierra de San Carlos, Anticlinal Huizachal-Peregrina y la Sierra Madre Oriental (Echánove, 1986; Pérez-Cruz, 1992; Ortiz-Ubilla, 2006; Ortiz-Ubilla y Tolson, 2004 y referencias aquí citadas) (Figura 1).

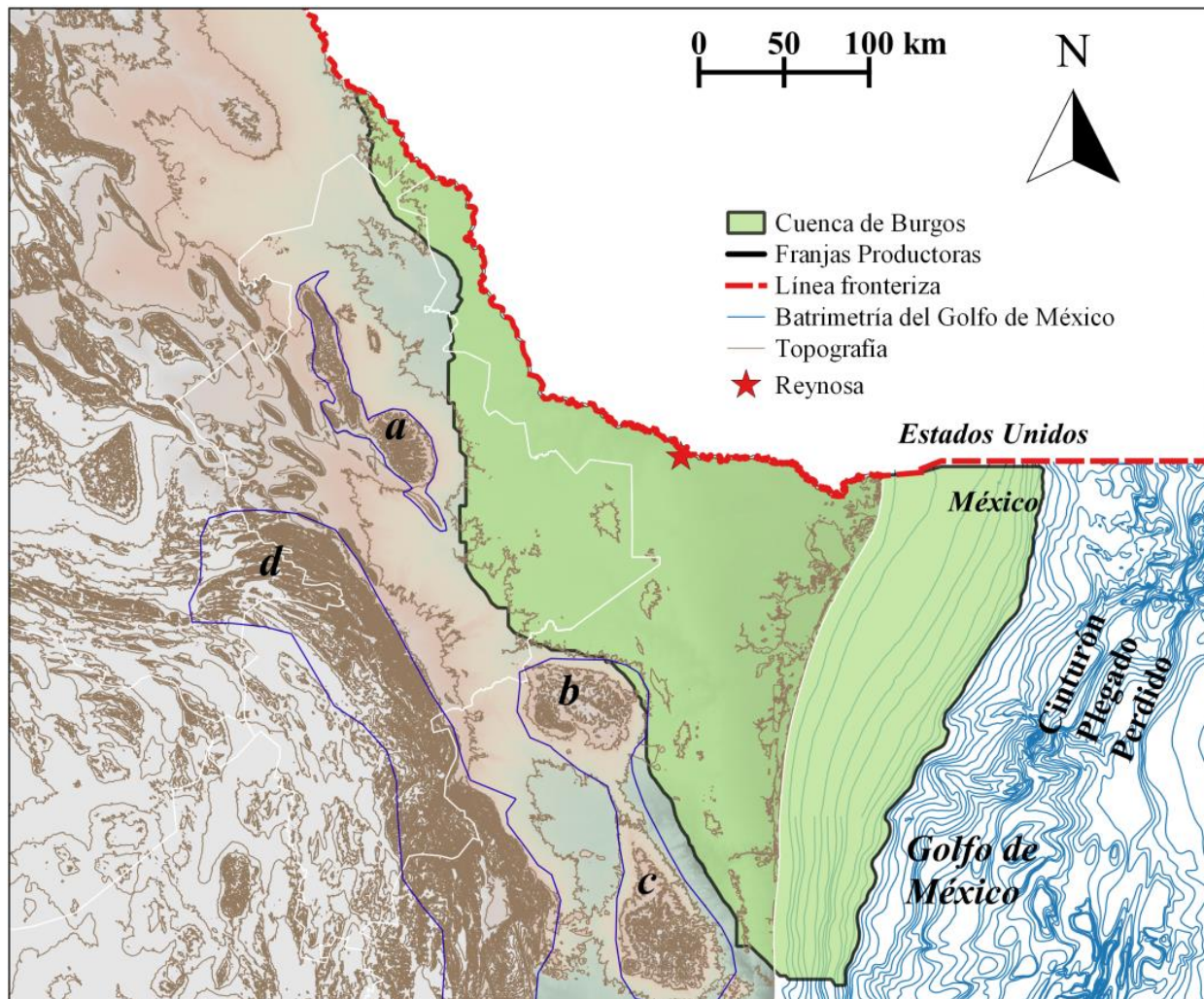


Figura 1. Altos estructurales que rodean a la Cuenca de Burgos: (a) Sierra Burro-Picachos, (b) Sierra de San Carlos, (c) Anticlinal Huizachal-Peregrina, (d) Sierra Madre Oriental. El mapa se realizó con datos vectoriales del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y de la CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos).

En esta región se depositaron rocas del Jurásico, Cretácico y Cenozoico (Echánove, 1986; González-García y Holguín-Quñones, 1992). El basamento está formado por esquistos y rocas

plutónicas, asignadas a la zona interna del Sistema Ouachita (Flawn *et al.*, 1961), deformado durante el Paleozoico combinado con un posterior magmatismo (Eguiluz de Antuñano, 2011a). Sobre este basamento hay una potente cubierta sedimentaria mesozoica-cenozoica, que puede tener hasta 10,000 m de espesor (Ortiz-Ubilla, 2006). En especial durante el Cenozoico, en la CB hubo acumulación de sedimentos siliciclásticos relacionadas con el desarrollo de sistemas deltaicos (González-García y Holguín-Quñones 1992).

2.3 Evolución Tectónica y sedimentaria

2.3.1 Basamento (Paleozoico y Jurásico medio)

La historia geológica y tectónica de la CB comienza con un proceso de *rifting*, como parte de la ruptura de Pangea, durante el Mesozoico, en el Jurásico Medio (Ortiz-Ubilla y Tolson, 2004; Hudec *et al.*, 2013) asociado con la apertura del Golfo de México (Goldhammer, 1999; Galloway *et al.*, 2000). El basamento se encuentra profundamente sepultado y sólo en algunas perforaciones de pozo se ha llegado a alcanzar; se compone por una asociación de rocas metamórficas, cuerpos intrusivos y graníticos (Ortiz-Ubilla, 2006).

La sedimentación Jurásica en el noreste de México fue notablemente afectada por la influencia de tres elementos paleogeográficos: el bloque de Coahuila, el bloque Burro-Picachos y la Sierra de San Carlos. A lo largo del borde de la Cuenca de Burgos, la plataforma Burro-Picachos y la Isla de Tamaulipas fueron los principales controles sedimentarios del Calloviano al Oxfordiano (Pérez-Cruz, 1992).

Una sucesión de rocas siliciclásticas (areniscas, lutitas y conglomerados) sobreyacen discordantemente al basamento que corresponde al Grupo Huizachal (Formaciones La Boca y La Joya) de edad Triásico-Jurásico Medio (Echánove, 1986). A esta sucesión de rocas basales le sigue la cubierta del Cretácico.

2.3.2 Cubierta sedimentaria en el Cretácico

Desde el Cretácico Temprano y hasta inicios del Cretácico Inferior (Cenomaniano) se depositaron carbonatos de ambiente profundo, representados por la Formación Tamaulipas y la Formación Agua Nueva, y lutitas de la Formación Otates (Eguiluz de Antuñano, 2011a). Del Turoniano al Maastrichtiano existió un cambio gradual en la sedimentación, el depósito de carbonatos fue gradualmente sustituido por siliciclastos en volúmenes crecientes (Formaciones San Felipe, Méndez y Grupo Taylor). Al poniente de esta cuenca se desarrollaron facies litorales y continentales en cuencas de tipo *foreland* (Cuencas de Parras, La Popa y Carbonífera de Sabinas).

Desde el Jurásico superior hasta el Eoceno, hubo depósito de sedimentos marinos bajo un régimen de subsidencia continua. Las rocas del Jurásico Superior y Cretácico tuvieron relativamente poca deformación (Eguiluz de Antuñano, 2011a). Sobre depósitos evaporíticos hay sinclinales amplios y anticlinales relativamente angostos, de edad imprecisa, con superficies de despegue y desacople de bloques cortados por fallas de expansión del Oligoceno (Chávez-Cabello, 2011).

2.3.3 Cubierta sedimentaria durante el Cenozoico

El estudio de la estratigrafía la Cuenca de Burgos es complicado, además su nomenclatura ha sido extrapolada de los diferentes episodios sedimentarios que se dieron en Estados Unidos desde Luisiana hasta el sur de Texas durante el Cenozoico, por esta razón se sigue la propuesta de Eguiluz de Antuñano (2011a).

Se subdivide geológicamente en cuatro franjas alargadas, que no han sido mapeadas hacia el sur por la ausencia de datos sísmicos (Figura 2), con una orientación norte a sur, distinguiéndose por sus características sedimentarias-estratigráficas, estructurales y su importancia económica en la industria petrolera, siendo de poniente a oriente su ubicación: Franja Paleoceno, Franja Eoceno, Franja Oligoceno y Franja Mioceno (Echánove, 1986).

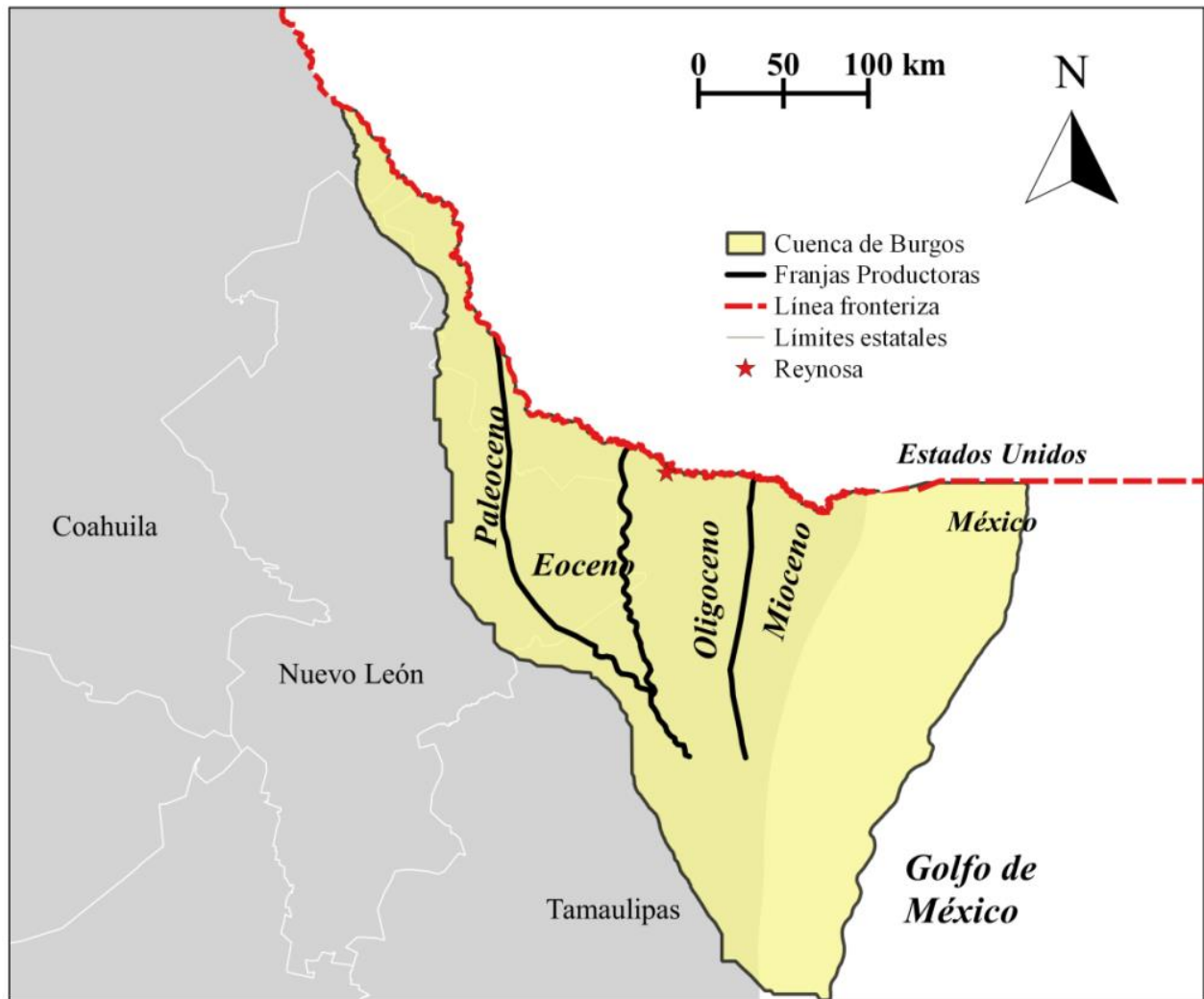


Figura 2. Provincia de la Cuenca de Burgos, en donde se muestra la distribución cronoestratigráfica de las franjas que la componen (Modificado de Echánove, 1986).

Las rocas del Cenozoico son de origen clástico. Consiste en una alternancia de lutita y arenisca las cuales varían en su composición de acuerdo al ambiente de depósito, principalmente de origen deltaico o de barras y marino somero, que fueron depositadas durante ciclos transgresivos y regresivos. Están agrupadas en unidades litoestratigráficas identificadas en subsuperficie, conocidas como Midway, Wilcox, Reklaw, Queen City, Weches, Cook Mountain, Yegua, Jackson, Vicksbourg, Frío, Norma, Catahoula, Oakville, Lagarto y Goliad, las cuales fueron depositadas durante el Paleoceno al Mioceno (Figura 3).

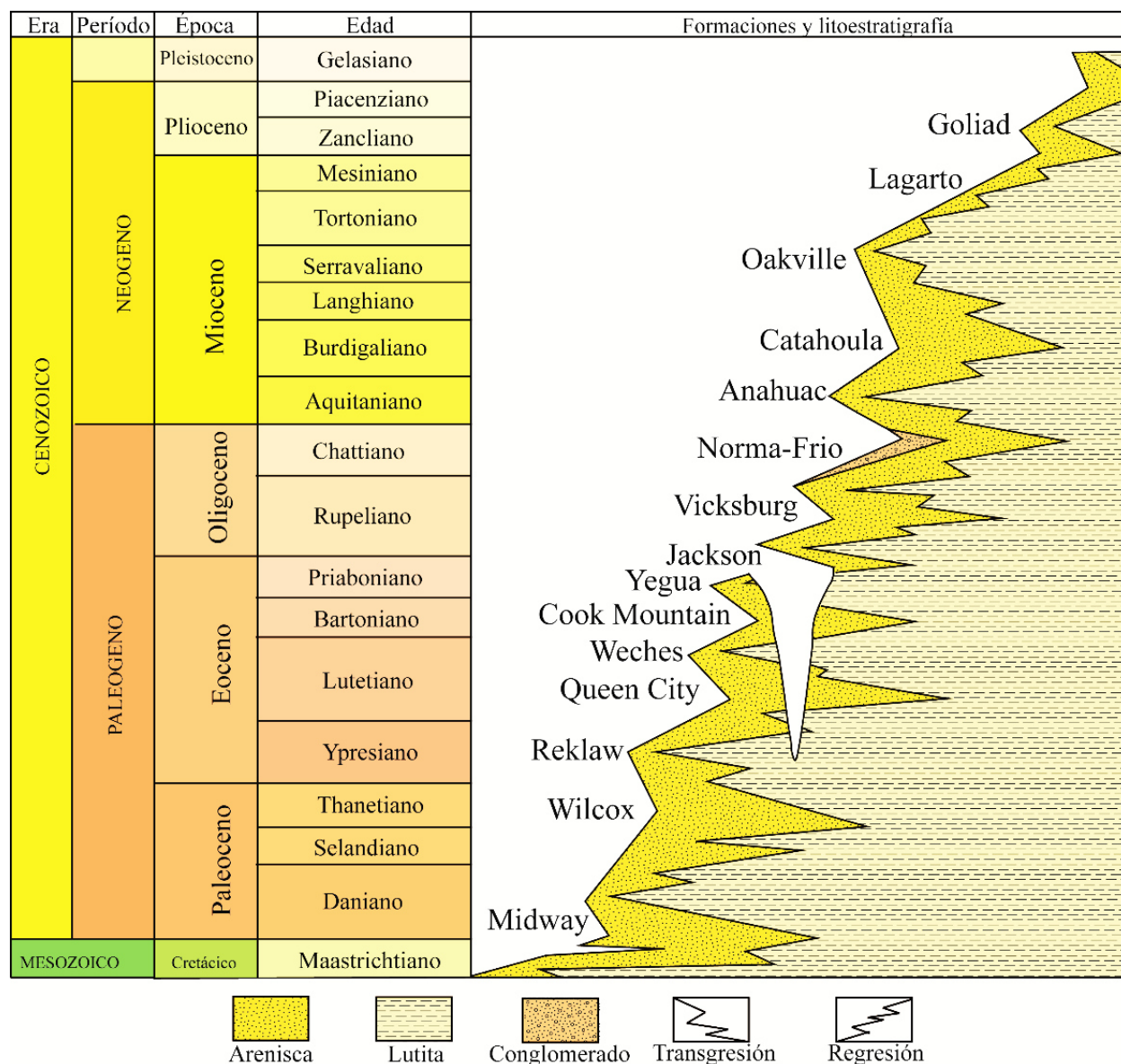


Figura 3. Secuencia estratigráfica cenozoica, marcando los ciclos transgresivos y regresivos en la Cuenca de Burgos (Modificado de Echánove, 1986 y CNH, 2018). Las edades fueron tomadas a partir de Eguiluz de Antuñano (2011a).

2.4 Geología Local

Se hace hincapié en las formaciones reconocidas en superficie, en donde se describe su litología, edad y ambiente de depósito a detalle. Las formaciones que corresponden del Eoceno medio hasta las más recientes, solo son mencionadas.

2.4.1 Formación Midway (FM)

El Paleógeno comienza con la Formación Midway (Paleoceno Inferior-Medio, 66.0-61.2 Ma). De manera general se compone de depósitos de areniscas finas, pertenecientes a un ambiente de plataforma media a externa (Echánove, 1986; Eguiluz de Antuñano, 2011a). En el noreste de México, esta formación representa uno de los límites del K—Pg.

En México, el espesor total de la Formación Midway se ha estimado de 1250 m con base en análisis sísmicos, cuyo mayor registro sedimentario se encuentra en el subsuelo (Pérez-Cruz, 1992). Dadas sus características litológicas, se ha interpretado como depósitos de abanicos submarinos, provocado por corrientes turbidíticas, interestratificados con secuencias hemipelágicas arcillosas (Uribe-Cifuentes *et al.*, 2004).

Esta formación se encuentra ampliamente distribuida al Sur de Texas en el área de Río Grande, en donde se ha considerado como un grupo. Gardner (1945), reconoció a la Formación Midway en México como un grupo potencial y lo dividió en dos formaciones: Midway inferior, altamente calcárea con minerales de glauconita, fósiles de ostras y gasterópodos, se encuentra distribuida en las cercanías de los municipios de Agualeguas y Cerralvo; y Midway superior, compuesta de arcillas y grandes concreciones, reconocida en el Río San Juan en el municipio de los Herreras. En este trabajo se reconocieron estratos con características litológicas similares a Midway superior (Figura 4).

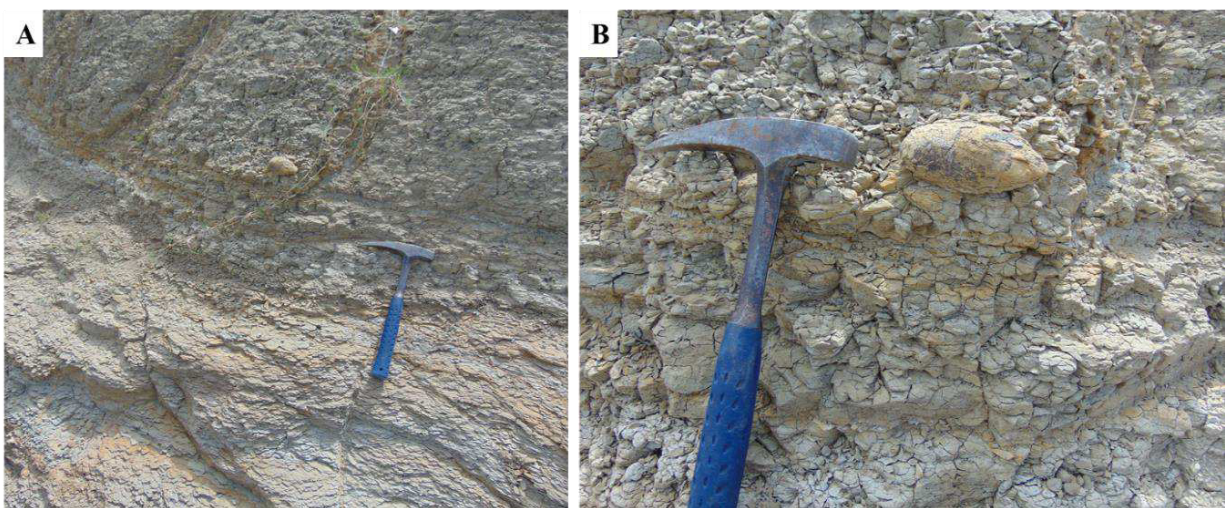


Figura 4. (A) Limolitas calcáreas de la Formación Midway. (B) Concreciones septarias. Ambos afloramientos en el río San Juan, en el Municipio Los Herreras, N.L., (Coordenadas: 25°53'56" N/99°23'59" O).

Durante el depósito de esta formación en el Paleoceno Temprano, la Cuenca de Burgos recibió el primer gran suministro de sedimentos siliciclásticos, dando lugar a una progradación forzada con dirección oeste (Hernández-Mendoza *et al.*, 2008). En el ámbito paleontológico, ha sido muy poco estudiada, los trabajos que se han realizado es el de Gardner (1945) en donde reportó especies fósiles de diferentes géneros de bivalvos como *Cardium*, *Cerastoderma*, *Ostrea*; y géneros de gasterópodos como *Calyptraphorus*, *Turritella* y *Volutocorbis*. La edad se ha determinado mediante foraminíferos planctónicos dentro de las biozonas *Globorotalia trinadensis* y *Globorotalia angulata* (Rodríguez-Lozano, 1976).

2.4.2 Formación Wilcox (FW)

Durante el intervalo Paleoceno tardío—Eoceno temprano la Formación Wilcox se depositó en la parte norte de la Cuenca del Golfo de México, en donde registró el segundo gran suministro de sedimentos clásticos en el margen continental, causando una progradación de la costa (Galloway *et al.* 2000). Se ha postulado que en el grupo Wilcox se depositaron ambientes de planicie costera desde Alabama, Texas y el noreste de México (Zarra, 2007). Sin embargo, los ambientes de depósito que caracterizaron el Paleoceno-Eoceno varían a lo largo de la PCG.

El depósito de esta formación marca un largo periodo de estabilidad tectónica, de subsidencia lenta y progradante, en donde se desarrollaron numerosos cuerpos arenosos alargados, formando sistemas de barras y cuñas progradantes hacia el oriente (Figura 5), (Galloway 2008; Galloway *et al.*, 2000).

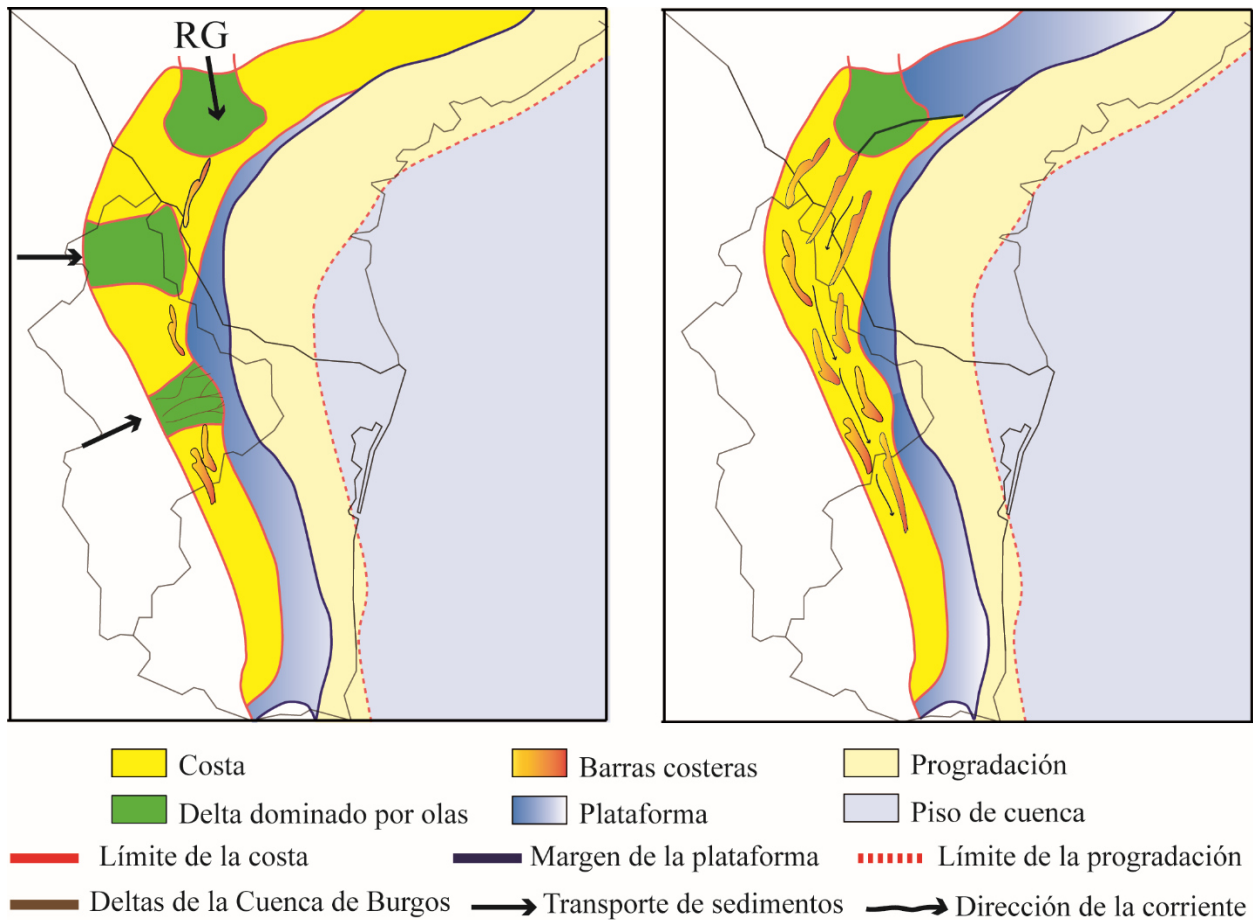


Figura 5. Mapa paleogeográfico de la distribución de las barras arenosas durante el depósito de la FW (Modificado de Galloway *et al.*, 2000).

Definida por Crider y Johnson (1906), estos autores marcaron como localidad tipo un afloramiento del condado de Wilcox en Alabama, con una serie de unidades que varían de gravas, areniscas continentales, areniscas marinas y lutitas. En la CB abarca del Paleoceno superior al Eoceno inferior (Thanetiano-Ypresiano, 61.2-48.5 Ma), (Figura 3), con características litológicas, bioestratigráficas y paleoambientales particulares. Su contacto inferior y superior es concordante con las Formaciones Midway y Reklaw. Esta formación se localiza en la Franja Eoceno en la CB, en donde se ha interpretado como desarrollo de barras de arenisca con crecimiento múltiple y complejos litoral, esta franja también abarca en forma parcial a las formaciones Reklaw, Queen City, Cook Mountain, Yegua y Jackson (Echánove, 1986).

La FW se ha dividido informalmente dentro de la CB en dos partes denominadas Wilcox Inferior o Wilcox Paleoceno y Wilcox Superior o Wilcox Eoceno (Ortiz-Ubilla y Tolson, 2004). Su depósito se ha interpretado como secuencias de tercer orden, probablemente controladas por cambios relativos del nivel del mar entre 60 y 48.5 Ma (Eguiluz de Antuñano, 2011a; Galloway *et al.*, 2000).

Se ha estimado un espesor de 1,200 m basado en datos de pozos y sísmica (Pérez-Cruz, 1992). En afloramiento Gardner (1945), nombro a la Formación Wilcox como Formación Indio localizada en el Rio San Juan al sur de China, N.L, de igual manera reconoció géneros de bivalvos como *Anomia*, *Ostrea* y *Venericardia*; géneros de gasterópodos como *Turritella*; y géneros de foraminíferos gigantes *Discocyclina* y *Pseudophragmina*. La edad ha sido determinada por foraminíferos planctónicos dentro de las biozonas *Globorotalia velascoensis*, *Glorobotalia rex* y *Globigerina soldadoensis* (Rodríguez-Lozano, 1976).

Esta formación tiene al menos tres afloramientos bien representados en los municipios de Los Herrera y China, NL, los cuales consisten de intercalaciones de arenisca, con limolita y lutita (Figura 6), en algunas ocasiones se presentan capas con abundante contenido fosilífero.

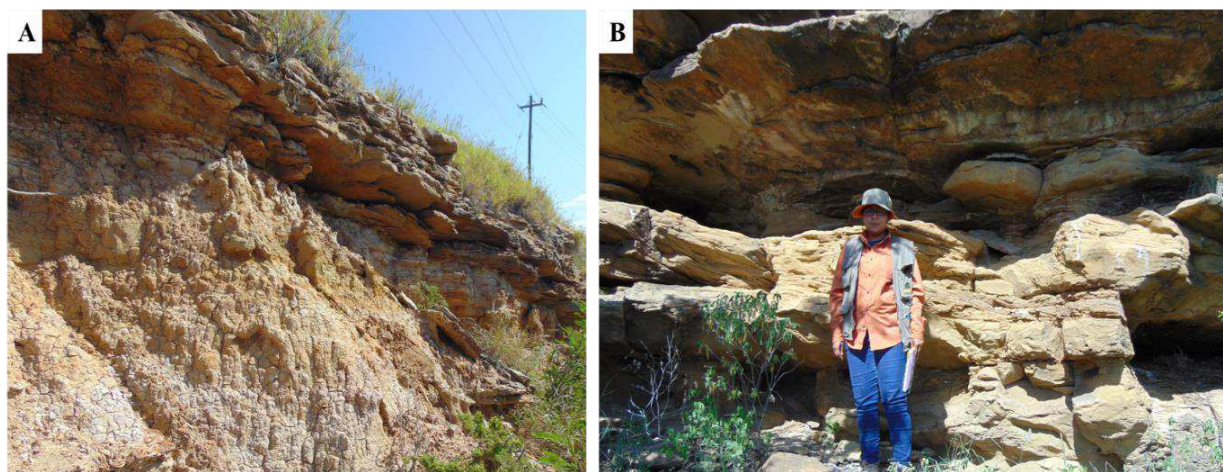


Figura 6. (A) Afloramientos de la FW en el municipio de China. (B) Afloramiento de la FW en Los Herreras, (Coordenadas 25°57'50.79"N, 99°19'53.62"O).

2.4.3 Formación Reklaw (FR)

La Formación Reklaw (Ypresiano superior—Lutetiano inferior, 48.5-46.5) fue considerada como parte del Grupo Clairbone por Penrose (1889). Posteriormente, Wendlandt y

Knebel (1929) redefinieron a esta formación en donde establecieron la localidad tipo en el condado de Nacogdoches al noreste del poblado Reklaw hacia el oeste de Texas; litológicamente la describieron como estratos de arenisca arcillosa micácea de color marrón a azul oscuro, con estratos intermedios de glauconita arcillosa, y con concreciones de color rojizo y con abundante contenido fósil (Garvie, 1996).

Entre los trabajos que se han realizado sobre esta formación se encuentran el de Pérez-Cruz (1992), en donde mediante análisis sísmicos, definió a la FR como una facies marina, con predominio de areniscas y lutitas.

Se le ha considerado como una facies de plataforma media a externa representada por una sección arcillosa con desarrollo de cuerpos arenosos. Mediante información sísmica y de pozos se midió un espesor en subsuelo de 700 a 800 m; esta unidad se encuentra inclinada hacia el oriente con cambios de espesor. Datos sísmicos han mostrado que se constituye por varios cuerpos arenosos, en su mayoría lenticulares (Echánove, 1986; Ortiz-Ubilla y Tolson, 2004). La edad de la formación se ha relacionado con las biozonas *Turborotalia aspensis* y *Truncarotaloides rohri* (Rodríguez-Lozano, 1976), previamente no se ha reportado contenido macro-paleontológico.

Se ha interpretado que la Formación Reklaw presenta discordancias intraformacionales (Ortiz-Ubilla, 2006), relacionadas a cuñas sedimentarias progradantes asociadas a etapas de *lowstand* (nivel del mar bajo), nombradas Cuña Inferior Reklaw y Cuña Superior Reklaw (Eguiluz de Antuñano, 2011a)

Cuña Inferior Reklaw. La discordancia de 48.5 Ma, marca que las secuencias preexistentes fueron fragmentadas en bloques rotados sobre un eje horizontal. Sobre esta discordancia se depositó una secuencia de bajo nivel y de cuña progradante, que denota gran aporte de terrígenos a la cuenca, producidos por denudación masiva de áreas continentales; este tipo de depósito se ha asociado más a un efecto tectónico, que a un efecto eustático (Eguiluz de Antuñano, 2004).

Cuña Superior Reklaw. La discordancia se sitúa a 46.5 Ma. Se ubica inmediatamente por debajo de la Formación Queen City, constituye una zona de escaso depósito durante la etapa de *lowstand*, mientras que hacia la base este límite constituye la superficie erosiva en la base de la cuña progradante (PEMEX, 2000). La tasa de sedimentación aumentó considerablemente

alcanzando espesores de más de 1000 m, esto comprobado mediante análisis de pozos (PEMEX, 2000).

Dentro de los trabajos realizados para localidad estudiada, La Presa en el parque estatal El Cuchillo, se encuentra el realizado por Navarro-de León *et al.* (1999) con fines hidrogeológicos y en donde la consideró como parte de la Formación Big Ford; esta nomenclatura también ha sido usada por el SGM (Servicio Geológico Mexicano) y ha caído en desuso. Otro tipo de estudios en el área están relacionados con cuestiones sísmicas (Montalvo-Arrieta *et al.*, 2018). Litológicamente se ha descrito como sucesiones de arenisca en discordancia con depósitos fluviales del Pleistoceno (Navarro-de León *et al.*, 1999).

2.4.5 Formación Queen City (FQc)

Durante el Eoceno medio, se estableció un ciclo regresivo-transgresivo, en donde se depositó la Formación Queen City (Lutetiano, 48.6-¿?), la cual se encuentra sobreyaciendo a la Formación Reklaw. Se compone de cuerpos areno-arcillosos intercalados, los cuales corresponden a sistemas de barras costeras o complejos de delta progradante (Eguiluz de Antuñano 2011a). Se ha interpretado, por medio de sísmica, que muestra un paulatino incremento de espesor hacia el oriente y se encuentra afectada por fallas (Ortiz-Ubilla y Tolson 2004). La FQc, a su vez es sobreyacida por la Formación Weches, caracterizada por ser altamente arcillosa y de carácter transgresivo de ambientes nerítico a medio-nerítico externo (Cabrera y Lugo-Rivera 1984).

En el Eoceno medio tardío se depositó la Formación Cook Mountain; está representada por sedimentos arcillo-arenosos, de tipo regresivo, de ambiente nerítico interno. Durante el Eoceno Superior, se depositó la Formación Yegua dividida en tres miembros: el inferior está marcado por el registro de un ciclo progradante asociado a un sistema de nivel alto (HST) (*sensu* Eguiluz de Antuñano, 2011b), su cima se encuentra interrumpida por una discordancia regional, asociada a un límite de secuencia de 39.5 Ma (Eguiluz de Antuñano, 2009, 2011b). El miembro medio de la Formación Yegua está situado sobre la discordancia de 39.5 Ma, caracterizado por discordancias internas, canales, deslizamientos de sedimentos y abanicos de piso marino; mientras que el miembro superior corresponde a una etapa del nivel alto (High System Track), y subyace a una facies de inundación que pertenece a la base de la Formación Jackson. En general

el depósito de la FY puede reflejar la etapa final de la deformación Laramide (Eguiluz de Antuñano 2009; 2011b).

A inicios del Oligoceno temprano inició una extensa trasgresión hacia el poniente, la cual contribuyó al depósito de la secuencia sedimentaria que representa la Formación Vicksburg, compuesta por una alternancia de arenisca y lutita cuya relación varía de acuerdo con el ambiente de depósito (Echánove, 1986). A finales del Oligoceno temprano y principios del Oligoceno Medio inició una etapa regresiva, en donde se depositaron sedimentos clásticos como conglomerados, areniscas y lutitas con intercalaciones de cuerpos arenosos (Ortiz-Ubilla, 2006). En el Oligoceno tardío se inicia un ciclo transgresivo/regresivo completo afectando la sedimentación del Mioceno temprano, depositándose una secuencia arcillo-arenosa marina, conocida como Formación Anáhuac (PEP, 2013).

En el Mioceno temprano terminó la regresión e inició una transgresión, en donde se depositó una secuencia areno-arcillosa; después de varios ciclos sedimentarios y una corta transgresión en el Plioceno, comenzó una extensa etapa regresiva y progradante hacia el oriente (Echánove, 1986).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en la Cuenca de Burgos en los Municipios de China y Los Herreras en el estado de Nuevo León. En esta actividad se identificaron las unidades litoestratigráficas y de las formaciones a estudiar, formaciones Wilcox y Reklaw. Esto se llevó a cabo mediante la descripción de la litología, identificación en campo de fósiles y trazas fósiles, toma de datos estructurales y recolección de muestras.

Las localidades estudiadas fueron “El Rebaje” que aflora en los ranchos El 7 y Chirinos, “La Curva” en el Municipio de China y “San José de las Lajas” en Los Herreras, pertenecientes a la Formación Wilcox; y “La Presa” ubicada al suroeste de la cabecera municipal de China perteneciente a la Formación Reklaw (Figura 7).

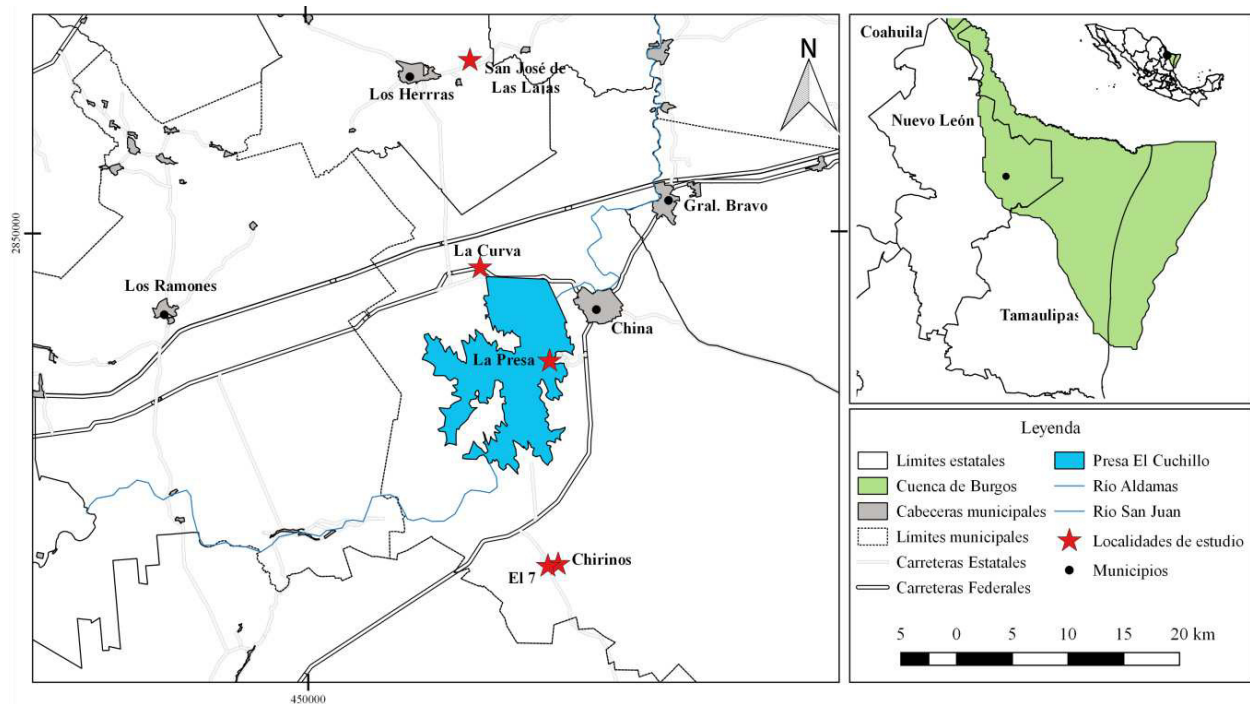


Figura 7. Mapa general de ubicación de las localidades estudiadas.

3.2 Muestreo

Se recolectó material con contenido paleontológico e icnológico para su posterior identificación y se realizó una bitácora fotográfica del material que no se pudo recolectar. En cada localidad estudiada se localizaron los estratos portadores con contenido icnológico y paleontológico. También se tomaron muestras de rocas para analizarlas petrográficamente. En las salidas posteriores se corroboraron los datos de campo y se comenzó a hacer un análisis minucioso.

El material analizado se depositó en la colección del Museo de Paleontología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, en donde se resguardará, y está catalogado con las siglas FCMP con los números correspondientes al año de colecta y número de ingreso a la colección. El ingreso a esta colección es de manera temporal, mientras se organiza la colección de Paleontología de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Se realizaron cuatro temporadas de campo, dos durante los meses de marzo, abril, septiembre y noviembre de 2017, y dos en los mismos meses para el año de 2018. Cada localidad se visitó dos veces.

3.3 Columnas estratigráficas

Se midieron cuatro columnas a detalle, una por localidad analizada. Los datos que se tomaron fueron: litología, estructuras sedimentarias y contactos entre los estratos. En cada una de las columnas se ubicaron niveles con contenido icnológico, para posteriormente identificar las litofacies. La simbología utilizada en las columnas se encuentra en la Figura 8.




































Simbolos usados en las columnas estratigráficas	
<p>Litología</p>  Arenisca  Arenisca limosa  Arenisca con estratificación cruzada  Arenisca con estratificación ondulada  Limolita  Lutita  Sección cubierta  Cubierta sedimentaria	<p>Granulometría</p> <p>Ar Arcilla Amf Arenisca muy fina Af Arenisca fina Am Arenisca media Ag Arenisca gruesa Ac Arenisca conglomerática</p> <p>Estructuras sedimentarias</p>  Estratificación cruzada planar  Estratificación ondulada  Estratificación tipo Hummocky  Láminación paralela  Ondulitas simétricas
<p>Trazas fósiles</p>  <i>Arenicolites</i> isp.  <i>Chondrites</i> isp.  <i>Diplocraterion</i> isp.  <i>Lockeia</i> isp.  <i>Ophiomorpha nodosa</i>  <i>Ophiomorpha</i> cf. <i>nodosa</i>  <i>Ophiomorpha</i> isp. 1  <i>Ophiomorpha</i> isp. 2  <i>Palaeophycus</i> isp.  <i>Planolites</i> isp.  <i>Protovirgularia dichotoma</i>  <i>Psilonichnus</i> isp.  <i>Rosselia</i>  <i>Skolithos linearis</i>  <i>Sinusichnus sinousus</i>  <i>Thalassinoides</i> isp.	<p>Contenido paleontológico</p>  <i>Venericardia (Venericor) diga</i>  <i>Venericardia</i> sp.  Fragmentos de bivalvos  Macroforaminíferos  Microfósiles  Fragmentos de plantas

Figura 8. Simbología utilizada en las columnas estratigráficas.

En la localidad “El Rebaje” el afloramiento se encuentra cubierto por una capa superficial de suelos, por lo cual no fue posible medir una sección estratigráfica en el área; sin embargo, el espesor de la columna fue estimado utilizando bases topográficas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) mediante la interpretación de planos de estratificación regionales a través de imágenes satelitales y métodos trigonométricos convencionales.

3.4 Litofacies

La clasificación de las litofacies se realizó en campo y con ayuda de láminas delgadas. Se basó en el tamaño de grano, la laminación interna y las estructuras sedimentarias en el techo del estrato. Se identificaron nueve litofacies y una subfacies (A-I), de acuerdo con la litología, el tamaño de grano y las estructuras sedimentarias. El código se encuentra en la tabla 1.

Tabla 1. Facies identificadas.

LITOFACIES	DESCRIPCIÓN
LArf (Lutita, Arenisca fina)	Lutita laminar de color verde oliva, que están intercaladas con estratos de arenisca 5 a 10 cm de espesor; no hay presencia de trazas fósiles o fósiles corporales
Af (Arenisca fina)	Arenisca fina, sin estructuras sedimentarias internas, y sin presencia de trazas fósiles o fósiles corporales
ArfL (Arenisca fina con laminación)	Arenisca fina a media con laminación interna bien definida y con bioturbación.
Arf-m (Arenisca fina a media)	Arenisca fina a media con estratificación cruzada de bajo ángulo u ondulante, con ondulitas en la base y superficie del estrato. Posee tonalidades color crema que intemperizan a colores óxidos, con bajo índice de bioturbación (IB=1).
Arf-mH (Arenisca fina a media con estratificación Hummocky)	Arenisca fina a media, con estratificación tipo <i>hummocky</i> o <i>swaley</i> , con bajo índice de bioturbación (IB=1-2).
Arb (Arenisca bioclástica)	Arenisca bioclástica
AMv (Arenisca masiva).	Arenisca masiva sin estructuras sedimentarias, con bajo índice de bioturbación (IB=2).








3.5 Icnotaxonomía

Se identificaron y describieron las trazas fósiles mediante sus icnotaxobases de acuerdo con Bromley (1996), Vallon *et al.*, (2016), y Rindsberg (2018), las cuales están basadas en una característica individualizada y suficientemente distintiva. Algunas de las más importantes son: la morfología general, la presencia o ausencia de la pared, el límite externo de la pared (*lining*), ramificaciones o bifurcaciones, la naturaleza del relleno y la presencia de un *spreite*, definido

como irregularidades en el sedimento, que indican el desplazamiento lateral o vertical del organismo y que se repiten según un patrón concéntrico o paralelo (Bromley, 1996). En cuanto a la preservación se siguió la propuesta de Seilacher (1953).

En campo se analizó el índice de bioturbación (IB) de manera visual tomando como base la metodología de Taylor y Goldring (1993). Este método usa siete grados de bioturbación (de 0 a 6), adicionando definiciones de densidad y superposición de estructuras biogénicas (Tabla 2). Este esquema resulta eficiente ya que toma en consideración aspectos como icnotaxones, diversidad, densidad y relaciones de corte entre las estructuras y la tasa de sedimentación (Taylor y Goldring, 1993).

Tabla 2. Índice de bioturbación (Tomado y modificado de Taylor y Goldring, 1993).

Índice de Bioturbación	Clasificación	Representación visual
0	Sin bioturbación	
1	Escasa bioturbación, estratificación característica y pocas trazas discretas o estructuras de escape	
2	Baja bioturbación, estratificación característica, baja densidad de trazas y estructuras de escape a menudo comunes.	
3	Moderada bioturbación, límites de estratificación netos, trazas discretas y superposición escasa.	
4	Alta bioturbación, límites de estratificación indistintos y alta densidad de trazas con superposición común.	
5	Intensa bioturbación, estratificación completamente perturbada, reeleboración limitada y excavaciones posteriores discretas.	
6	Bioturbación completa y reelaboración de sedimentos debida a la superposición reiterada de deformaciones.	

3.6 Tafonomía

Se decidió realizar un análisis tafonómico en la localidad del Rebaje, ya que el material macrofósilífero es muy abundante en esta localidad en comparación con las otras localidades donde solo se presentan escasos parches o moldes de macrofósiles.

Se identificaron las características bioestratinómicas de los bioclastos tales como: orientación, desarticulación, fragmentación, selección de tamaños y formas, y empaquetamiento.

Las descripciones tafonómicas se realizaron bajo la clasificación de (Davies *et al.*, 1989) tales como: orientación en sección transversal (cóncavo hacia abajo o hacia arriba), articulación (valvas articuladas vs valvas separadas), fragmentación (más del 20% de valvas rotas). Las interpretaciones tafonómicas se basaron en la nomenclatura propuesta por Kidwell *et al.* (1986), usando los criterios de composición taxonómica, biofábrica, geometría y estructura interna (simple o compleja).

3.7 Análisis petrográfico

Las muestras para el análisis petrográfico se tomaron de las capas con contenido icnológico, a excepción de las capas con abundante contenido paleontológico (El Rebaje y parte inferior de San José de las Lajas). Se realizaron 12 láminas delgadas y se analizaron bajo el microscopio petrográfico marca LEICA DMLP, elaboradas previamente en el laboratorio de preparación de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.

El análisis petrográfico se realizó con la finalidad de identificar los minerales y la textura de las rocas para hacer una clasificación tradicional de las areniscas de acuerdo al modelo de (Folk *et al.*, 1970) (Figura 9).

La clasificación se realizó en función de los componentes minerales: (cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos), de acuerdo con los siguientes criterios: el porcentaje de matriz, grado de redondez y esfericidad y contacto entre los clastos.

- Qz: Se distingue entre:
 - QM (Cuarzo Monocristalino): Se consideran como tales a todos los granos de Cuarzo con tamaño $> 0,0625$ mm. aunque haya varios granos juntos.
 - QP (Cuarzo Policristalino): Son los granos $< 0,0625$

- Feldespatos: Se distingue entre: Pg y FK
- Fragmentos Líticos: (FL), sin diferenciar si son de origen metamórfico o volcánico.

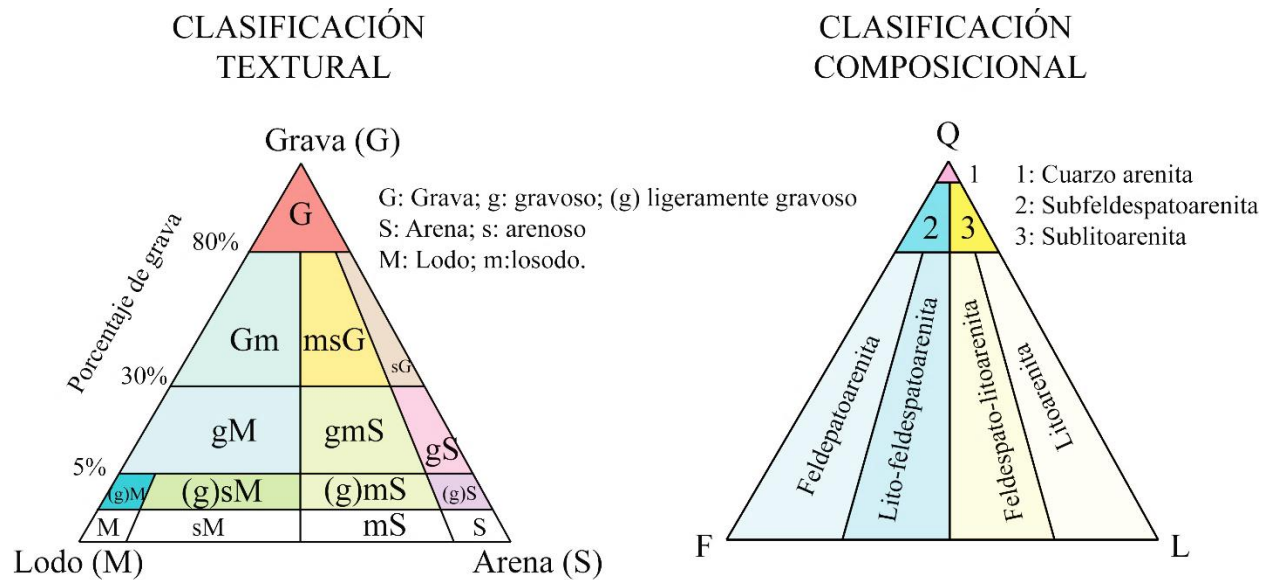


Figura 9. Clasificación textural y composicional de Folk *et al.* (1970).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las localidades estudiadas (El Rebaje; San José de las Lajas; La Curva y La Presa). En los apartados 4.2 a 4.5, los análisis de litofacies y petrográficos se muestran por localidad y sus acrónimos son descritos en la Tabla 1. Por su abundancia, el estudio paleontológico y tafonómico de *Venericardia* se realizó solo para la localidad El Rebaje.

En el apartado final (4.6) se detalla el estudio icnotaxónico de las trazas fósiles identificadas en las localidades, estas se encuentran ordenadas alfabéticamente y acompañadas de una descripción en campo, ubicación en la columna estratigráfica y discusión del icnotaxón determinado.

4.2 El Rebaje

En el área de El Rebaje, se identificaron tres afloramientos, uno basal, uno medio y uno superior. El basal está compuesto de capas delgadas de areniscas limosas con intercalaciones de arenisca de 10 a 15 cm de espesor en donde no se registró la presencia de asociaciones icnofosilíferas o paleontológicas (Figura 10 D). La parte media y superior se encuentran separadas por ~900m lineales y ~172 m en espesor real calculado a partir de un buzamiento de 10-20°. La parte media, rancho El 7, contiene un registro fosilífero e icnológico que se repite en el afloramiento superior, rancho Chirinos (Figura 10 A y B).

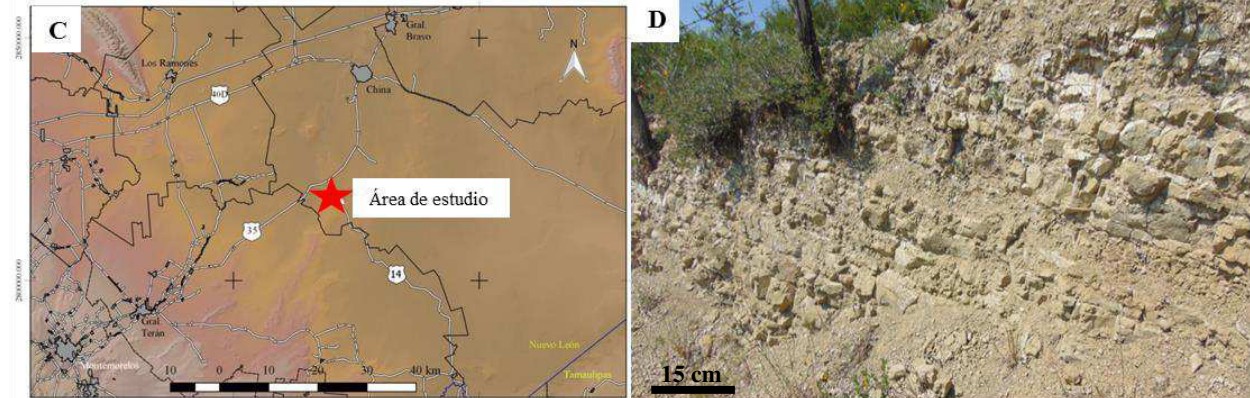


Figura 10. (A) Columna estratigráfica interpretativa. (B) Perfil topográfico esquemático (la escala horizontal no corresponde con la vertical), los horizontes tienen un buzamiento de 10° a 20° exagerados en el esquema. (C) Mapa de ubicación. (D) Corte de la carretera General Terán-China, con litología más fina que las capas superiores, correspondientes a la FW parte basal de El Rebaje. El significado de la litología se encuentra en la figura 8 del capítulo 4

4.2.1 Litofacies y petrografía

Se reconocieron dos litofacies: **Arenisca fina (Arf-m)** y **Arenisca bioclástica (Arb)** en los afloramientos medio y superior de la localidad de esta localidad (El 7 y Chirinos). La descripción su nomenclatura se describe en la Tabla 1.

Litofacies Arf-m. Ranchos Chirinos y El 7, consiste en arenisca fina con laminación cruzada de bajo ángulo. En la superficie tiene un contacto irregular con la litofacies **Arb**. Los estratos alcanzan un espesor aproximado de 30 cm. El contenido icnológico de esta litofacies

está caracterizado por *Ophiomorpha*, comúnmente dentro de los estratos y *Chondrites* en la base. Ésta última traza solo se reconoció en el Rancho Chirinos.

Petrográficamente, el porcentaje de matriz es menor al 10%, el tamaño de grano varía de medio a fino. Los componentes son de cuarzo mal seleccionado (46 %) con alto grado de angulosidad, la extinción de los cristales es angulosa; los feldespatos son más abundantes (52.3%); en general tienen contactos tangenciales (Figura 11 B), los líticos son muy escasos (1.6%). Como minerales accesorios tiene glauconita, micas y circones, esta roca de acuerdo con Folk *et al.* (1970), se nombra como feldespatoarenita (Apendice 2). Hay bioturbación con relleno muy fino (Figura 12 A). Algunas láminas se tiñeron con rojo de alizarina para destacar el contorno de los cristales al teñirse la matriz calcárea (Figura 11 B).

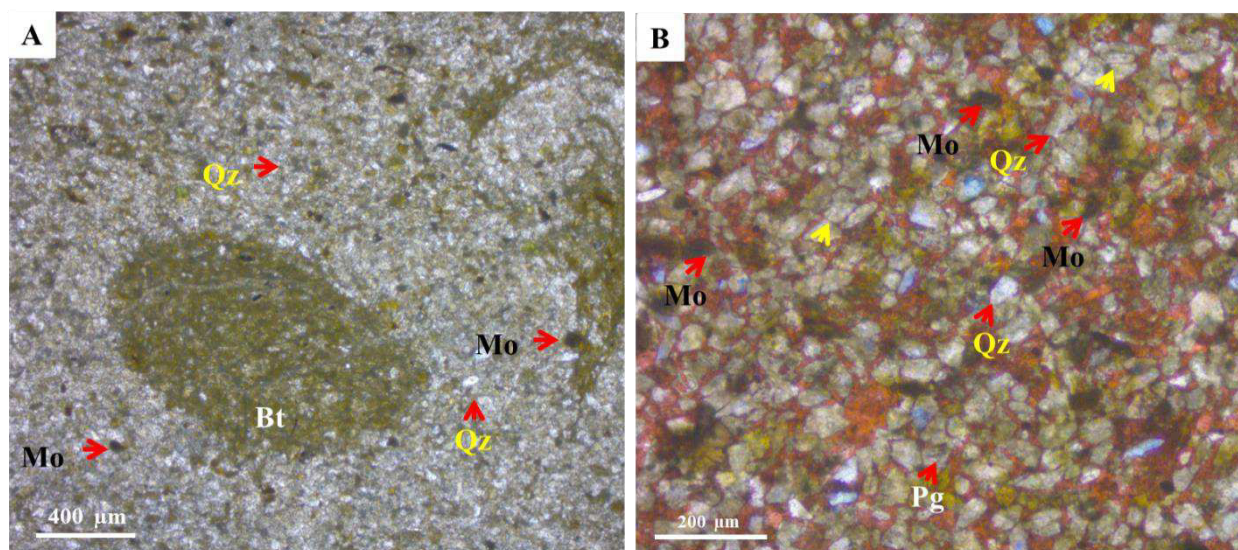


Figura 11. Microfotografías de la facies. (A) Arenisca fina con cuarzo (Qz), y con bioturbación (Bt), y en menor proporción con minerales opacos (Mo). (B) Muestra teñida con rojo de alizarina donde los granos se ven con más detalle.

Litofacies Arb. Rancho El 7 y Chirinos, ambos comparten las mismas características macroscópicas, sin embargo, se diferencian petrográficamente. Esta litofacies se reconoce por contener arenisca bioclástica de grano medio, con restos de bivalvos y gasterópodos. No hay presencia de estructuras sedimentarias internas y tiene un contacto irregular en la base con la **litofacies Arf-m**. El análisis de los componentes bioclásticos se realizó a nivel tafonómico debido al alto contenido, mismo que se presenta en la sección 4.4.

Se describe por separado la petrografía de ambos afloramientos, debido a sus diferencias microscópicas:

Rancho Chirinos, la matriz es menor al 20%; abundan restos de bivalvos mayores a 1 cm; hay restos de gasterópodos y foraminíferos. En cuanto a sus componentes minerales hay cuarzo (30%), feldespatos y fragmentos líticos en este caso los bioclastos. En general, se encuentran mal seleccionados, angulosos y algunos flotando en la matriz; como minerales accesorios hay glauconita y menos proporción micas (Figura 12).

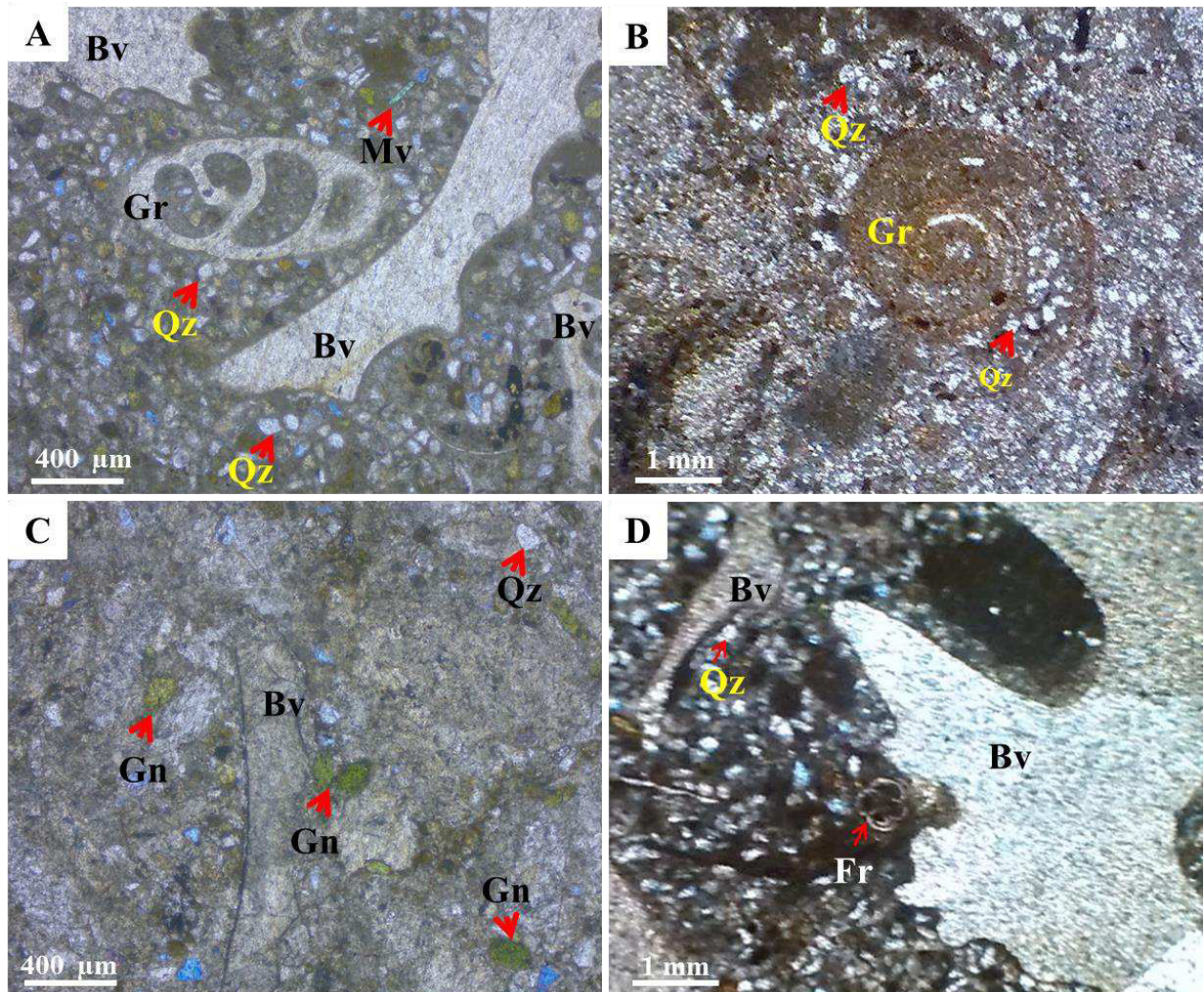


Figura 12. Rancho Chirinos, Lámina MD (A) Arenisca, con abundantes bioclastos: bivalvos (Bv), gasterópodos (Gr); con cuarzos (Qz) y feldespatos flotando en la matriz, y escasas micas (M). (B) Arenisca con gasterópodos (Gr), bivalvos (Bv) y cristales de cuarzo (Qz). (C) Arenisca con bivalvos (Bv), cristales de glauconita (Gn), y cuarzo (Qz). (D) Arenisca con abundantes bivalvos (Bv) y escasos foraminíferos (Fr).

Rancho el 7, también se presenta abundantes restos de bivalvos con tamaño mayor a 1 cm, moderado contenido de foraminíferos gigantes del género *Discocyclina* (Figura 13 A), abundantes algas y escasos briozoos, con algunos pellets entre las costillas de los bivalvos (Figura 14 C,). La matriz es más fina que en el Rancho Chirinos (Figura 14 D) y es más abundante, no entrando dentro del rango de las areniscas, ya que su tamaño es del orden de limos.

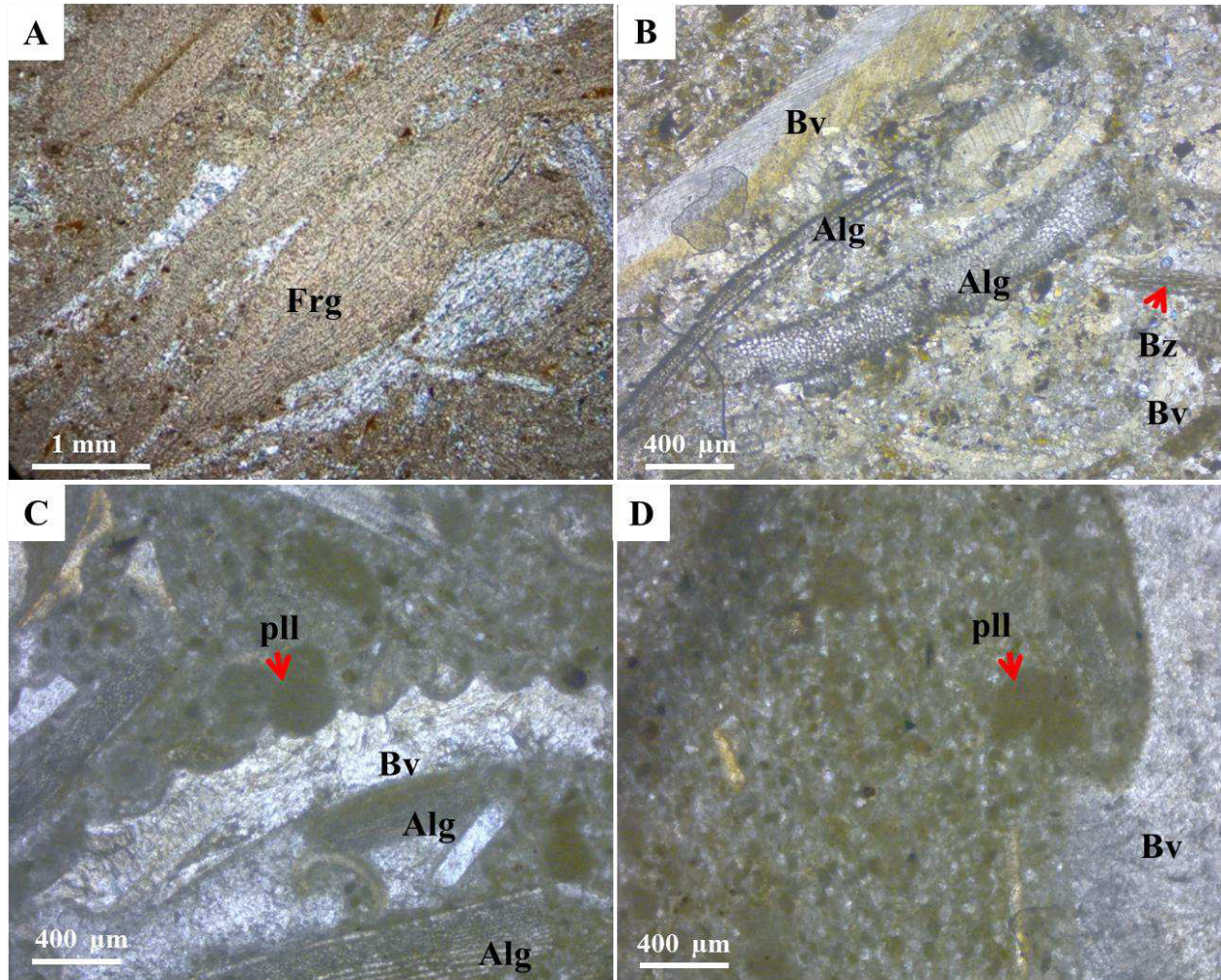


Figura 13. Microfotografías de la facies G, Arfb, en el Rancho El 7. (A) Arenisca fina con foraminíferos del género *Discocyclina* (Frg). (B) Algas (Alg) y fragmentos de briozoos (Br). (C) Arenisca fina con restos de bivalvos (Bv) y pellets (pll). (D) Arenisca arcillosa con restos de bivalvos y abundantes pellets.

4.2.2 Análisis paleontológico y de *Venericardia*

La presencia del género *Venericardia* Steward (1930) es abundante en los afloramientos medio y superior de la localidad El Rebaje. A continuación, se describe la especie identificada.

Venericardia (Venericor) zapatai Gardner y Bowles, 1937

Descripción: presenta una concha ovalada y ancha, costillas anchas y planas con interespacios en forma de U, un margen anterior recto hacia el umbo y redondeado hacia abajo, un umbo más redondeado, e internamente el área del ligamento es grande y triangular (Figura 14 E). El tamaño promedio de *Venericardia (Venericor) zapatai* tiene medidas que van de 71.0 mm de anchura y 88.2 mm de altura (Tabla 3).

Discusión: El subgénero *Venericor* se caracteriza por presentar una concha oblicuamente subtrigonal, con costillas inmaduras angulares y suavemente espaciadas, que en estado juvenil se encuentran bien marcadas (Figura 14 C) mientras que en estado adulto son planas y bajas, llegando a desvanecerse (Figura 14 E). De las especies referidas por Perrilliat (1963) para el Eoceno del Noreste de México, el material de *Venericor (Venericor) zapatai* estudiado por Perrilliat (1963) proviene de la localidad “Los Jaboncillos”, a 15 km al sur de China, Nuevo León, considerando el sitio más cercano a las localidades de estudio.

Tabla 3. Medidas de *Venericardia (Venericor) zapatai* (en mm).

No. de ejemplar	Localidad	Anchura	Altura	Convexidad
1	R. 7	40.7	41.4 mm (VD)	0
2	R. 7	40.2	46.7 (VD)	0
3	R. 7	58.4	60.0 (ambas valvas)	36.6
4	R. 7	57	68.0(ambas valvas)	34
5	R. 7	63.05	78 (ambas valvas)	50
6	R. 7	58.01	88.2 (ambas valvas)	35
7	R. 7	70.1	83.5 (ambas valvas)	53.5
8	R. 7	62	75.4 (VD)	0
9	R. 7	70.5	72 (ambas valvas)	44
10	R. 7	46.55	53.1 (VI)	0
11	R. 7	71	73 (VI)	0
12	R. 7	60	73 (VI)	0
13	R. 7	55.05	58 (VD)	0

14	R. 7	50	47 (VD)	0
15	R. 7	54.1	58.2 (ambas valvas)	29.2
16	R. 7	70.1	73.2	0
17	R. 7	76.1	75.5	0

Las conchas del material analizado se encuentran en su mayoría desarticuladas, la parte central de la concha muestra un mayor porcentaje de erosión (70%), no importando si es la valva derecha o izquierda (Figuras 14 A-D). En ejemplares completos, el relleno es de sedimento más fino (Figuras 17 H y G), diferente al sedimento arenoso del que están embebidas. La preservación de las valvas es irregular, siendo la parte exterior la más dañada, también con una coloración oxidada (Figuras 14 C y D).

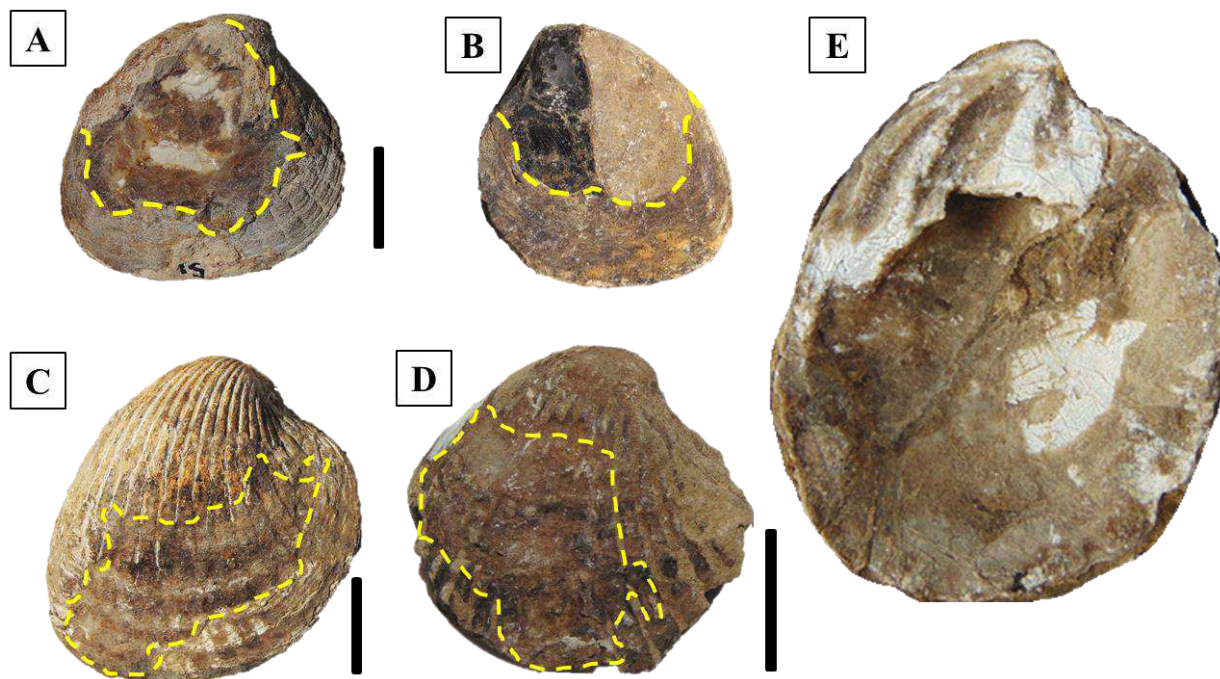


Figura 14. *Venericardia (Venericor) zapatai*. (A, C) Vista exterior de la valva izquierda. (B) Vista exterior de la valva derecha. (D) Valva juvenil izquierda, con las costillas bien marcadas. (E) Vista interior de la valva derecha. Escala=2 cm.

4.2.3.1 Análisis tafonómico

En el rancho El 7, las características tafonómicas que se presentan son: alta fragmentación y desarticulación. Aparecen reorientadas y en posición convexa hacia abajo y convexas hacia arriba, hay una mezcla de tamaños y formas.

Los bioclastos se observan como fragmentos tridimensionales fuertemente empaquetados dentro de un estrato de 35 cm de espesor (Figura 15 A). La geometría es de un pavimento lateral que se extiende por más de 400 m, con concentraciones de conchas en arenisca. La biofábrica en sección transversal es concordante y muestra agrupaciones de conchas apiladas (Figura 15 B), y en menor proporción se conservan en posición caótica (Figura 15 C). Sobre la superficie del estrato, las valvas están orientadas de una manera bimodal (Figura 15 D). Estas acumulaciones se caracterizan por ser monotípicas (baja diversidad), y la estructura interna es compleja. La mayoría las conchas de *Venericardia* conservan la microestructura de la concha original y en menor proporción se observan moldes.

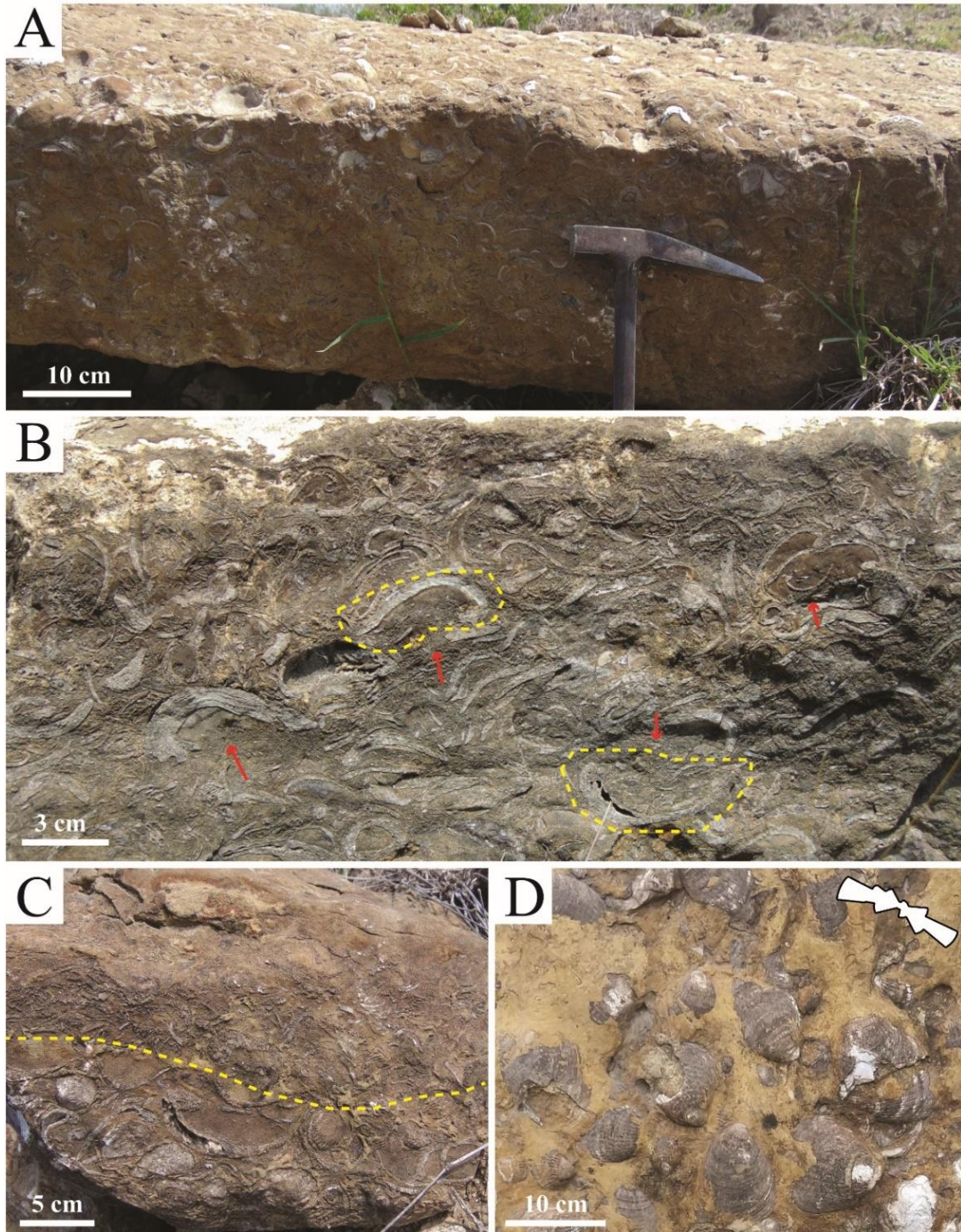


Figura 15. (A) Bioclastos en sección transversal. (B) Sección transversal de un estrato (las flechas y la línea punteada indica la orientación de las valvas). (C) Concentración de conchas con variación en el tamaño (línea amarilla). (D) Valvas de *Venericardia* en la superficie del estrato (con orientación bimodal).

En el rancho Chirinos, las características son muy similares con el afloramiento anterior. La mayoría de los bioclastos están desarticulados y fragmentados, en sección vertical la orientación es concordante en posición convexa hacia arriba y hacia abajo, en una vista de planta los bioclastos aparentan estar mejor conservados.

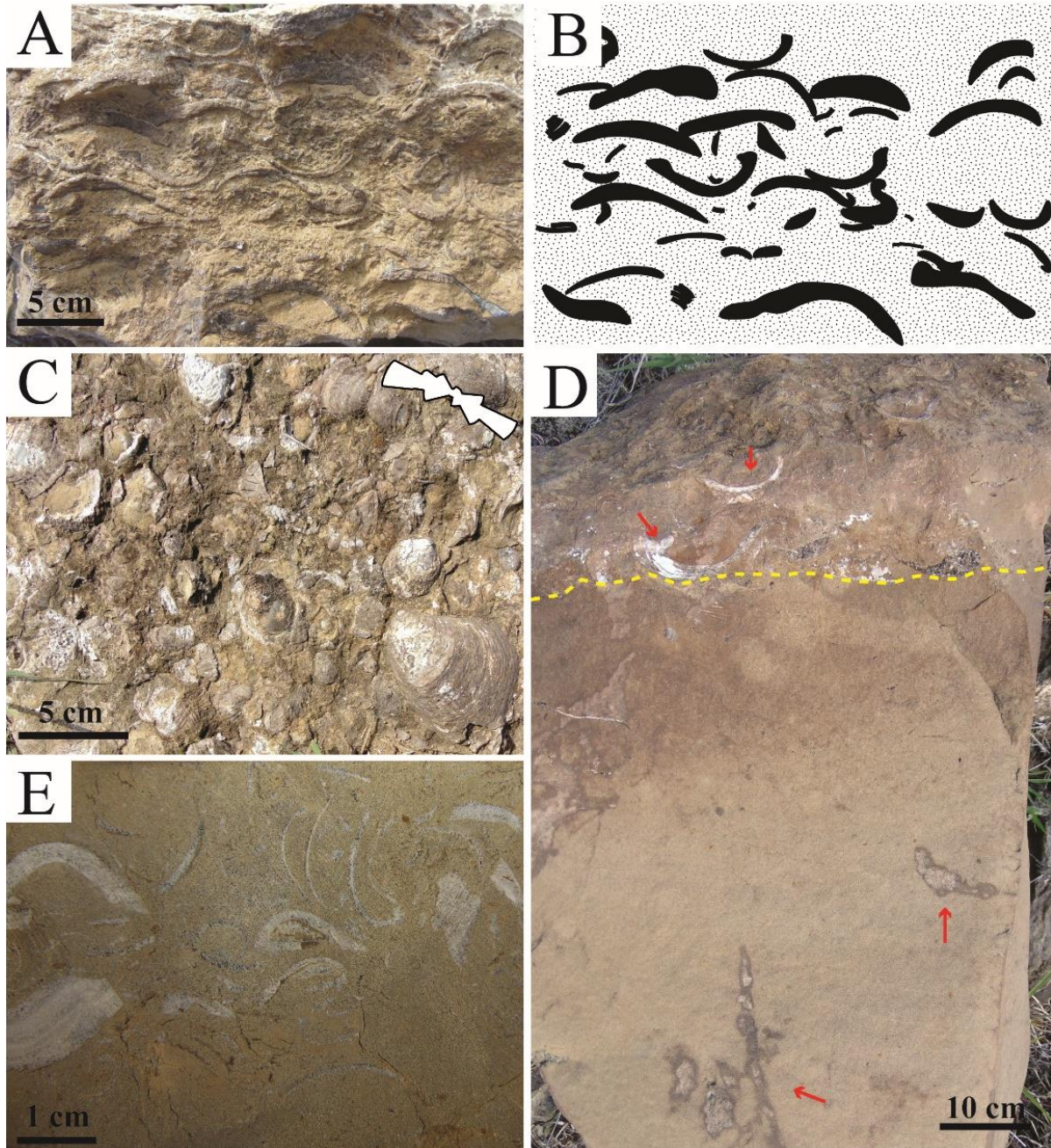


Figura 16. (A) Concentraciones de *Venericardia* en posición convexa hacia abajo y hacia arriba. (B) Esquema de la posición de las conchas dentro del estrato. (C) Valvas en vista de planta con orientación bimodal. (D) Limite entre las concentraciones (línea punteada amarilla y trazas fósiles indeterminadas (flecha roja). (E) Bioclastos en posición caótica.

La geometría del estrato se presenta como un pavimento lateral que se extiende por más de 500 m con acumulaciones regulares de conchas en arenisca rojiza, que exhiben conchas desarticuladas y fragmentadas en plano dorsal y ventral (Figuras 16 A-B). En general, la orientación de las conchas es similar a las conservadas en El 7. La biofábrica en sección transversal es concordante, los bioclastos están anidados, densamente empaquetados y clasto-soportados (Figuras 18 A-B y E). Sobre la superficie de la capa, la orientación de las valvas es bimodal (Figura 18 C), en menor proporción hay bioclastos en posición caótica (Figura 16 E). Las concentraciones son monotípicas y la estructura interna es compleja. Por debajo de estas acumulaciones se encuentran trazas de *Ophiomorpha* isp. y trazas no identificadas (Figura 16 D).

Los cortes que se realizaron a las valvas muestran que aún se encuentran bien preservadas las capas mineralógicas que las componen (Figuras 17 A-D), sin embargo, algunas zonas se encuentran diagenetizadas o desgastadas (Figura 17 A); mientras que el relleno es de arenisca muy fina, y con fragmentos de bioclastos (Figuras 17 G y H). En algunas zonas el relleno muestra oxidación (Figura 17 F).

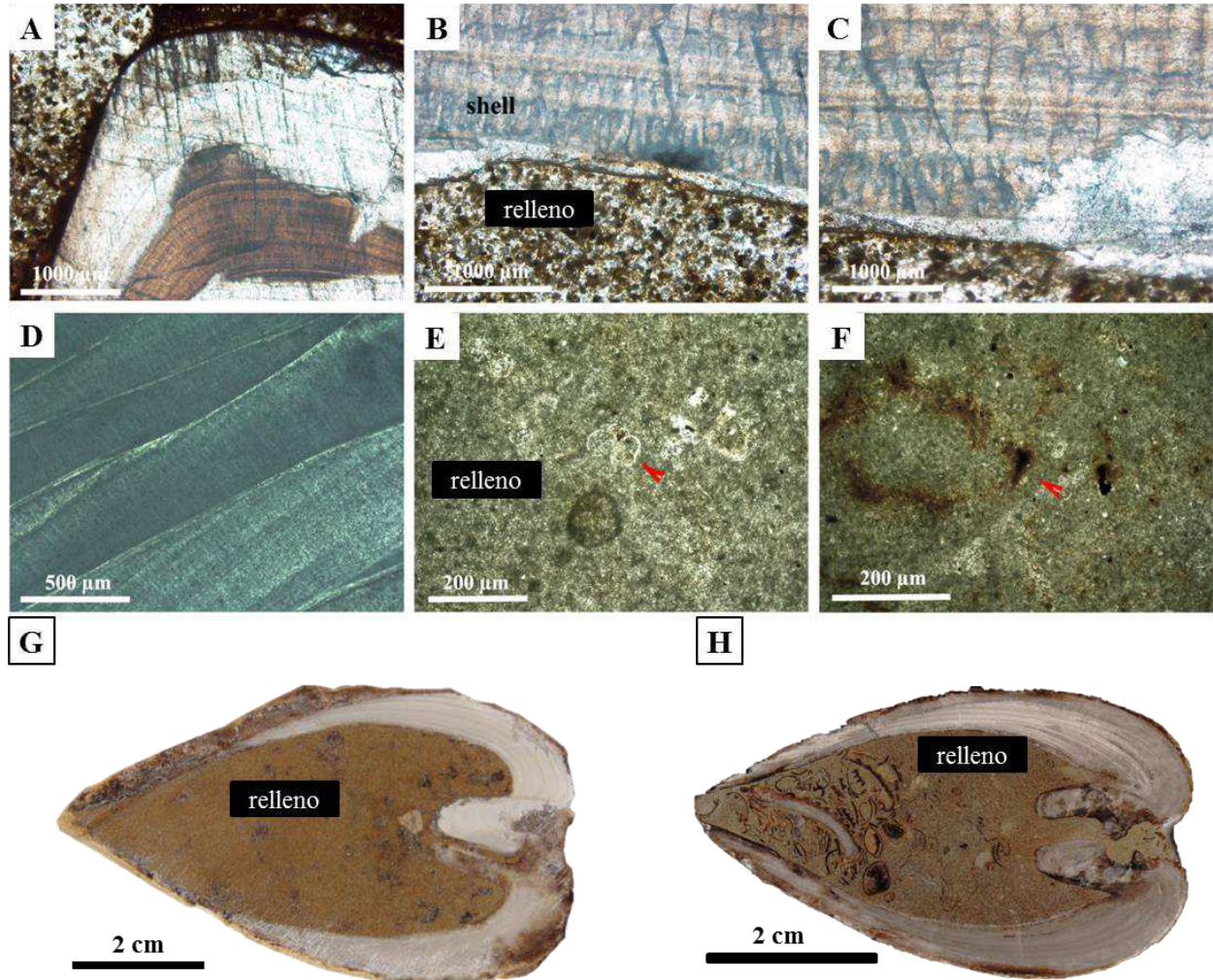


Figura 17. (A-C) Microestructura de las conchas de *Venicardia*, con el mismo tipo de sedimento relleno del que las rodea. (D) Microestructura original, con las capas bien diferenciadas. (E) Relleno de sedimento fino, con foraminíferos del género *Globorotalia* (Flecha roja). (F) Relleno de sedimento fino con zonas oxidadas (Flecha roja). (G) Corte transversal de una concha completa de *Venericardia* (ambas valvas), con relleno muy fino de arenisca. (H) Corte transversal de una concha completa de *Venericardia* (ambas valvas), con relleno fino (hacia la derecha) y relleno de otros bioclastos (izquierda).

4.3 San José de las Lajas

La sección medida y el material estudiado se localizan en las cercanías del ejido San José de las Lajas al este del municipio de Los Herreras, N.L. (Figura 18 A). Esta sección se compone de dos afloramientos integrados en la columna estratigráfica.

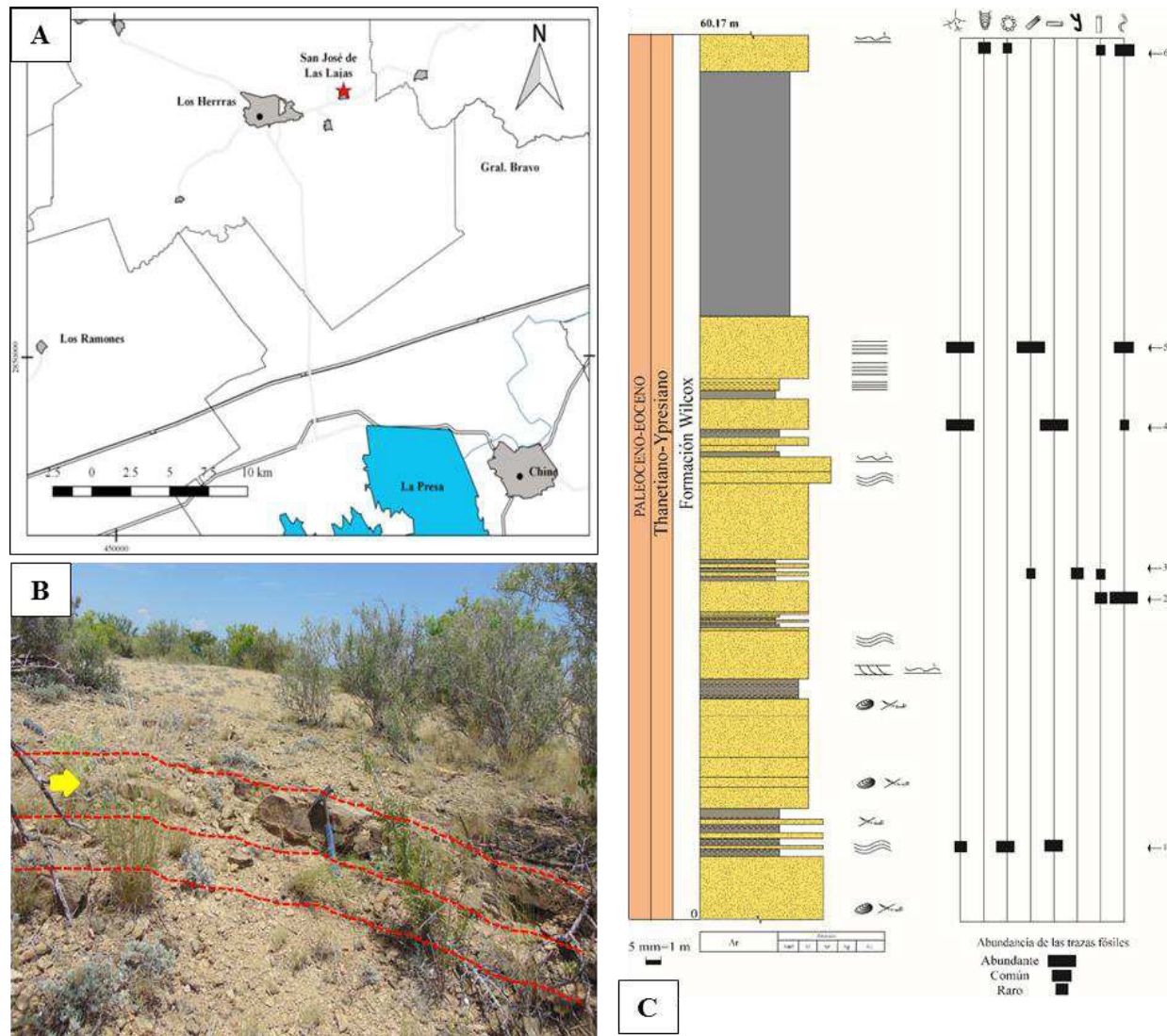


Figura 18. (A) Ubicación geográfica del área de estudio, en el Municipio de los Herreras. (B) Vista panorámica de la localidad, la línea punteada y flecha amarilla marcan la posición de los estratos a nivel del suelo. (C) Columna estratigráfica, localidad San José de las Lajas, se señalan los niveles con contenido fósil (tanto trazas fósiles como restos de fósiles) y abundancia relativa. El significado de la litología se encuentra en la figura 8 del capítulo 4.

4.3.1 Litofacies y petrografía

El espesor total de la sección medida es de 60.17 m (Figura 18 C). Se compone de arenisca fina a media y con alto contenido de icnofauna, distribuida en 6 niveles. Se identificaron 5 litofacies.

Litofacies Arb. Arenisca de grano medio con alto contenido de bioclastos, de color crema a ocre. Hay restos fósiles de bivalvos muy fragmentados y retrabajados. Hacia la cima de los estratos se observaron valvas completas. Esta facies se encuentra en la parte inferior de la sección y en la parte media inferior (Figura 19 A).

Petrográficamente la matriz es de limolita y representa más del 20% del área de la lámina delgada, hay alto contenido de bioclastos, con tamaño de 2mm hasta 5 mm y en algunas zonas hay contacto entre ellos. Con respecto a sus minerales se compone de: cuarzo (27.3%), feldespatos (20%), litícos (52.6%), hay presencia de minerales accesorios como glauconita que se encuentra de manera muy abundante. Esta arenisca se clasifica como feldespato-litoarenita (Apéndice 2).

Abundan fragmentos de bivalvos y algunos restos de gasterópodos. En cuanto a la mineralogía hay cuarzos (Figuras 19 B y C) y cristales de glauconita (Figuras 19 E y F).

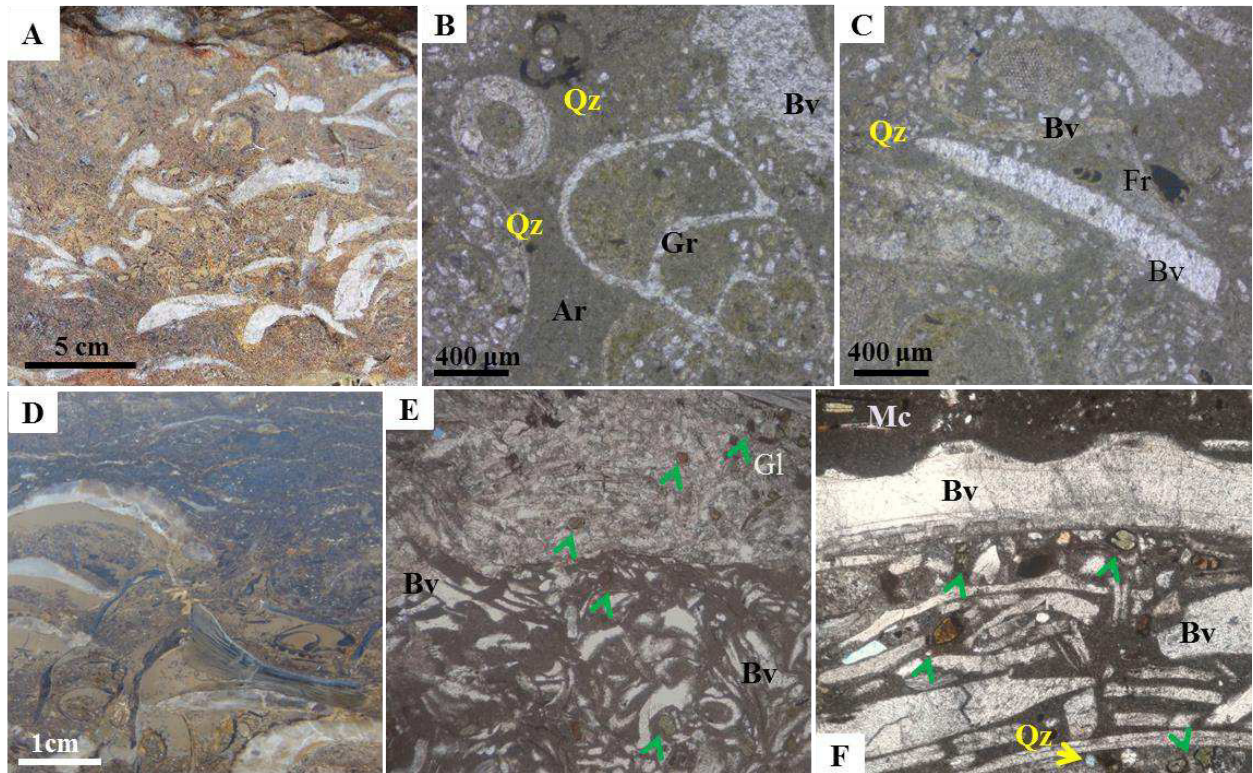


Figura 19. Facies G, Arb: (A-D) Valvas desarticuladas de *Venericardia*, en posición cóncava y convexa, en la figura D, se aprecia que el sedimento relleno de las valvas es más fino que la matriz. Lámina delgada SJL-1. (B) Arenisca fina a muy fina, con abundantes bioclastos: gasterópodos (Gr), restos de bivalvos (Bv); con cristales de cuarzo angulosos (Qz). (C) Bioclastos: gasterópodos (Gr), restos de bivalvos (Bv) y escasos briozoos (Bzoo); y con cristales de cuarzo mal seleccionados y angulosos (Qz). (D) Corte transversal de una concentración de valvas desarticuladas. (E y F) Arenisca muy fina, con abundantes fragmentos de bivalvos (Bv), minerales de glauconita (Gl), cuarzo (Qz) y escasas micas (Mc).

Litofacies Lf-Arf. Capas heterolíticas (intercalaciones de lutita laminar color crema con de arenisca fina y laminar de 10 cm de espesor). La parte media de la sección se compone de bancos de capas grano decreciente: arenisca, limolita, lutita (Figura 20 A). Como trazas fósiles se presenta *Sinusichnus sinuosus* y *Skolithos* isp. (Figura 20 B, flecha amarilla).

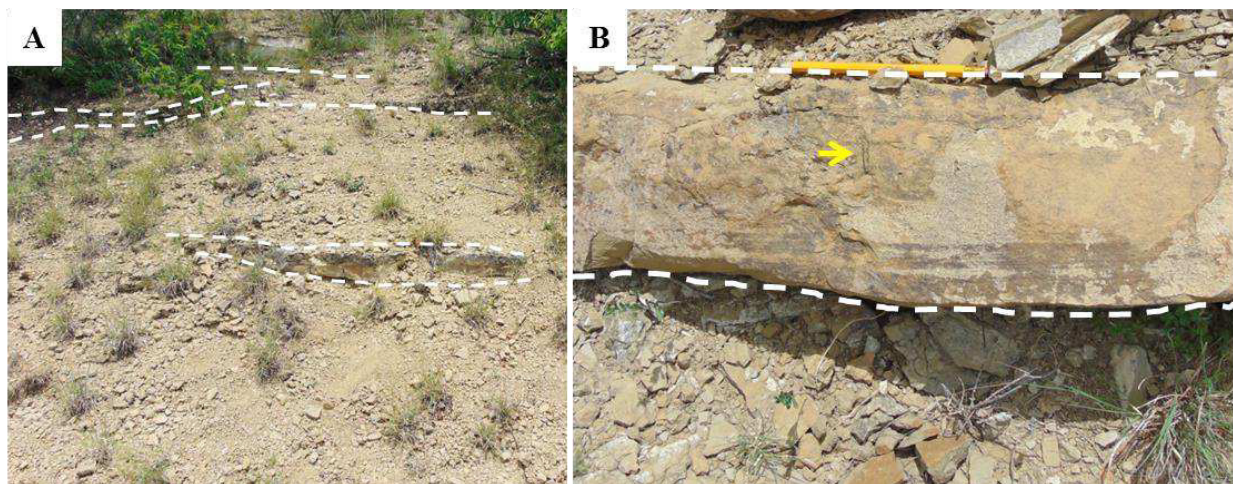


Figura 20. Facies B, Lf-Arf: (A) Capas heterolíticas de lutita y arenisca (la línea punteada indica los estratos de arenisca). (B) Acercamiento de un estrato de arenisca con *Skolithos* isp. (Flecha amarilla) (escala del lápiz=10 cm).

Litofacies Arf. Consiste en arenisca fina con laminación ligeramente ondulada, de color crema. En la base hay presencia de *Chondrites* isp, en la parte media *Ophiomorpha* y sobre los estratos hay *Planolites*. También se presentan estructuras post-sedimentarias similares a estructuras de carga y una superficie erosiva (Figura 21 A).

Petrográficamente se compone de arenisca fina a muy fina, moderadamente seleccionada, y con clastos subredondeados, con contactos puntuales y longitudinales, presenta 10% de matriz limosa. Se compone de cuarzo (42.3%), feldepatos (57 %) y escasos fragmentos líticos (0.66 %). Como minerales accesorios tiene micas, minerales autigénicos como glauconita y escasos circones (Figuras 21 C y D). De acuerdo con sus componentes se clasifica como fedelspatoarenita (Apéndice 2).

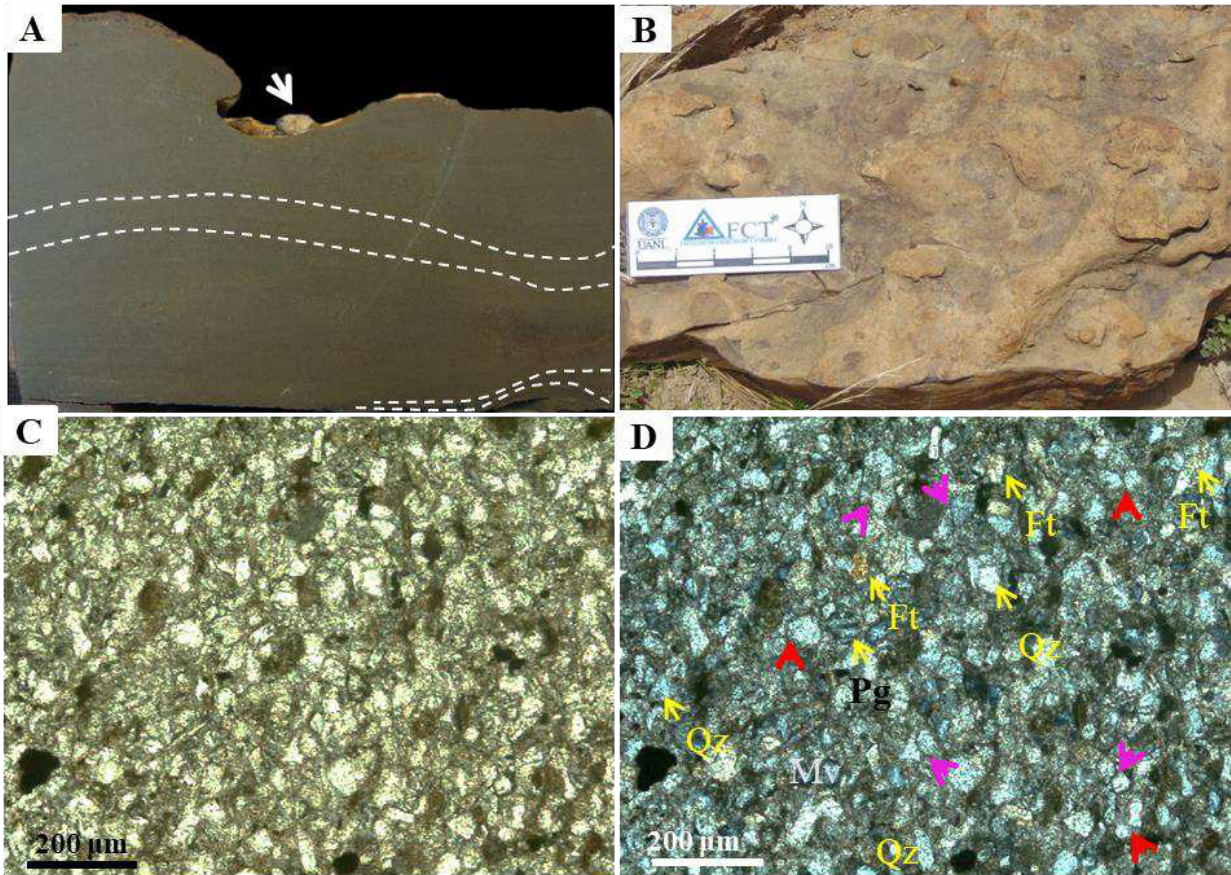


Figura 21. Corte transversal y muestra de mano correspondiente a las Facies C, Arf 1. (A) Facies C, Arf, con laminación muy fina y ligeramente ondulada (línea punteada), en la superficie se conservan trazas fósiles como *Planolites* isp. (Flecha blanca). (B) Vista de planta con estructuras deformadas. Lámina delgada SJ1, (C) Acercamiento a la lámina con nicols paralelos (D) Misma sección con nicols cruzados, se observan minerales como: cuarzo (Qz), feldespatos (Ft), plagioclasa (Pg) y micas (Mv) con contactos puntuales (flecha rosa) y longitudinales (flecha roja).

Sub litofacies Arf. Arenisca fina con laminación interna, se presentan sets de areniscas finas bien definidas con intercalaciones de láminas de limolitas, hay presencia de grietas de desecación (Figura 22 A). La bioturbación es baja (IB=1-2), representada por *Chondrites* isp., *Skolithos* isp., *Sinusichnus sinuosus* y *Planolites* isp. Se presenta en la parte media y media superior de la columna (Figura 22).

Petrográficamente se compone de arenisca fina, con laminación muy fina, en donde se observaron arcillas entre los cristales de cuarzo (Figura 22 B), estas laminaciones corresponden al 50% de la muestra. Se compone de cuarzo (41.6%), feldespatos (57%) y en menor porcentaje

líticos (1.3%), como minerales accesorios hay abundantes micas, glauconita y minerales opacos (Figuras 22 C y D), esta arenisca se nombra como feldespatarenita (Apéndice 2).

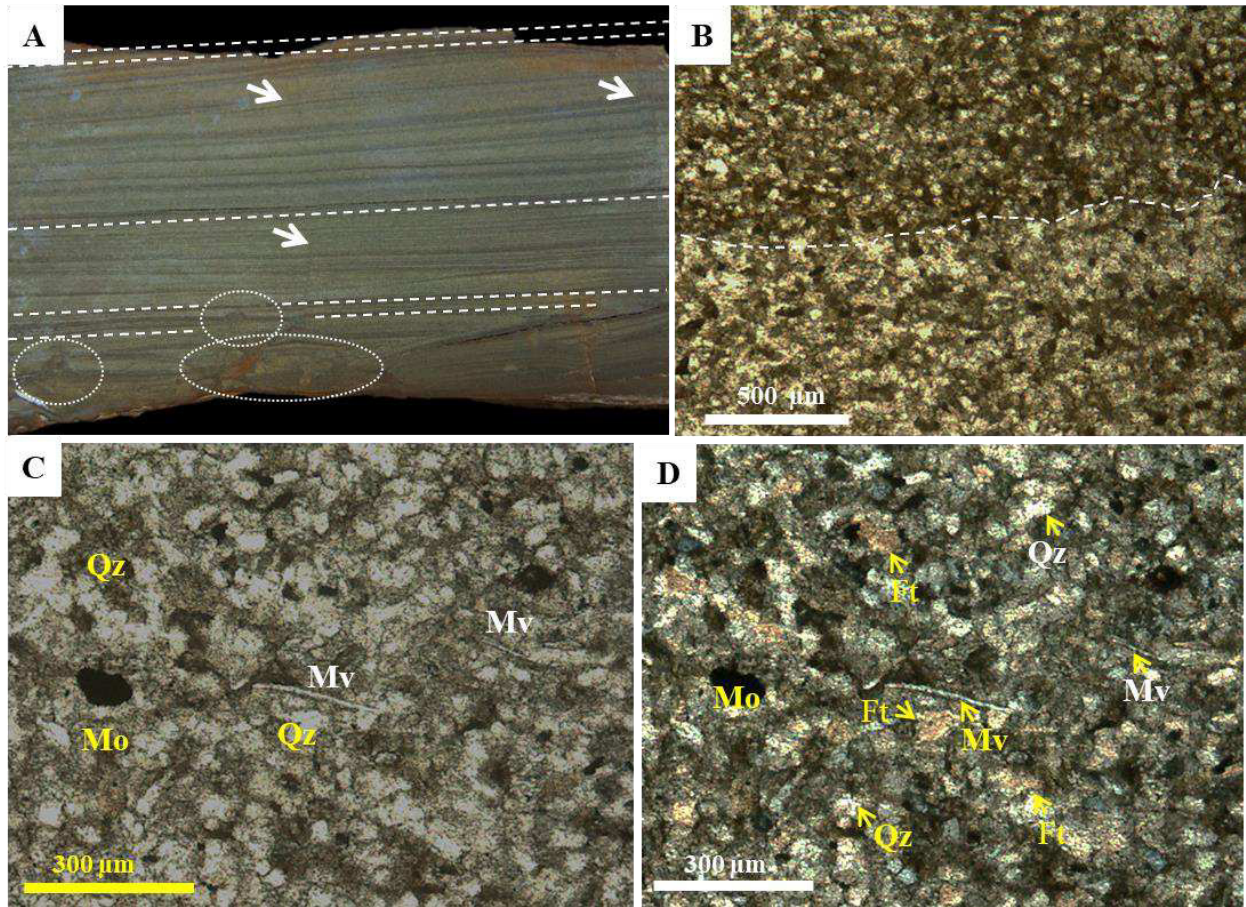


Figura 22. Corte transversal correspondientes a la Subfacies C, Arf 1. (A) Corte con laminación bien definida y grietas de desecación (Flecha blanca) las líneas punteadas indican los sets de laminación, los círculos indican las trazas fósiles. Lámina delgada SJL-5, (B) Arenisca con laminación bien definida y con nicols paralelos; la zona más oscura está compuesta por arcillas (Ar), mientras que la zona clara cristales de cuarzo (Qz) (C) Acercamiento de la lámina con nicols paralelos, en donde se observan minerales opacos (Mn); cristales de cuarzo angulosos (Qz) y Moscovita (Mv) entre los cristales de cuarzo. (D) Misma sección con nicols cruzados, donde se distinguen los cuarzoes de los feldespatos (Ft).

Litofacies Arf-m Esta litofacies se encuentra en la parte superior de la columna (nivel 6), la laminación de las capas está menos definida y en la superficie hay ondulitas simétricas con presencia de trazas fósiles como *Sinusichnus sinuosus*, *Diplocraterion* isp, *Skolithos* isp. y

Ophiomorpha isp. Las capas de esta litofacies tienen un color rojizo y se encuentran muy oxidadas por intemperismo.

Petrográficamente se compone de arenisca fina a media, moderadamente seleccionada, con contactos puntuales y longitudinales, presenta menos del 10% de matriz. Contiene principalmente feldespatos (57%) cuarzo (42.3%), en menor proporción fragmentos líticos (0.6%). Como minerales accesorios hay micas del tipo moscovitas, en algunas zonas de la lámina analizada hay presencia de minerales opacos (Figura 23). De acuerdo con sus componentes minerales se clasifica como una feldespatoarenita (Apéndice 2).

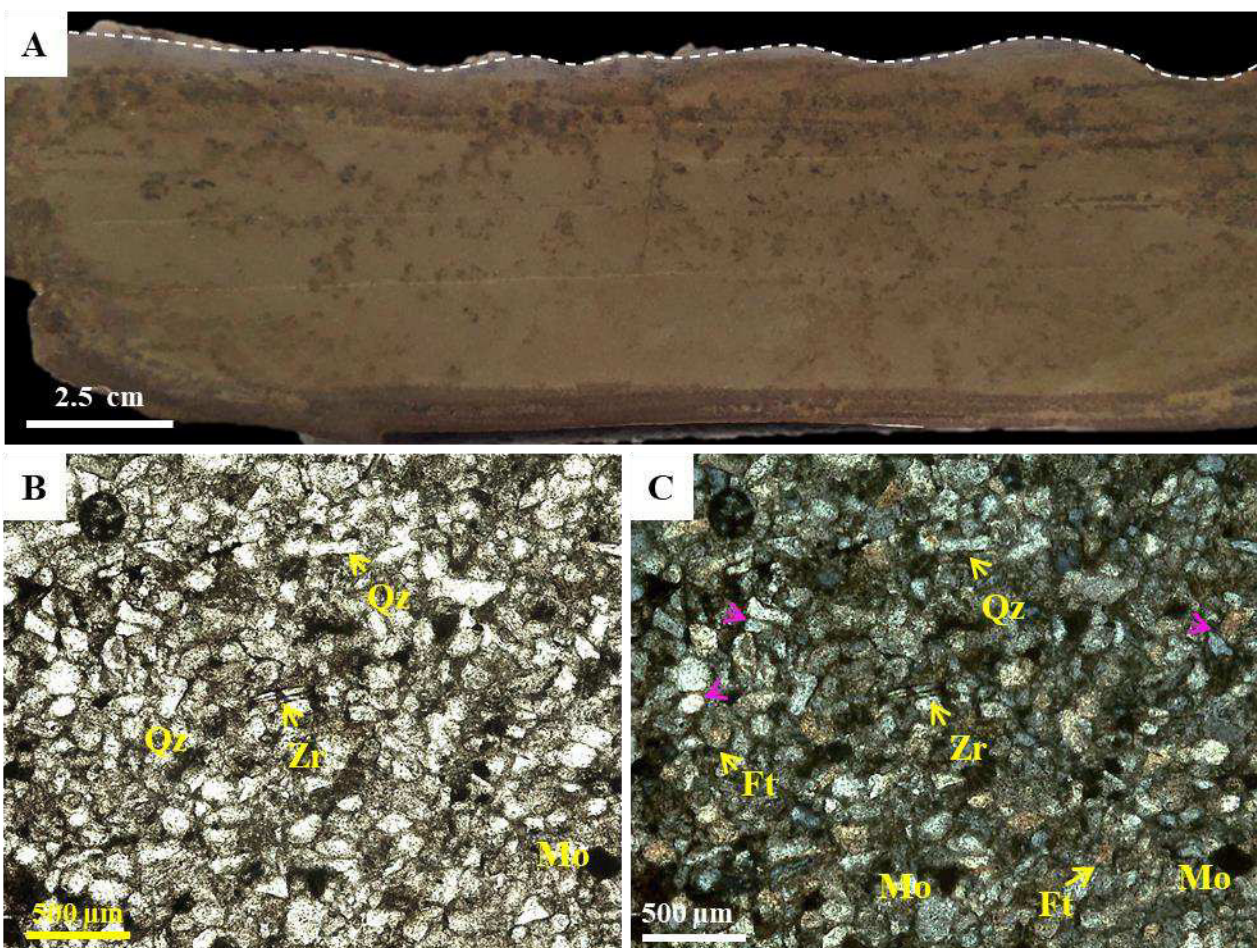


Figura 23. (A) Corte transversal de una muestra de mano de la litofacies Arf-m, con ondulitas simétricas en la superficie (línea punteada blanca). Lámina delgada R6, (B) Lámina con nicols paralelos, se observan los diversos componentes, cuarzo (Qz), feldespatos (Ft), Zr (circón), minerales opacos (Mo). (C) Misma sección con nicols cruzados, donde se distinguen los cuarzoes de los feldespatos (Ft) y con contactos longitudinales (flecha rosa).

4.4 La Curva

La sección medida y el material estudiado se dentro del municipio de China, N.L., (Figura 24). Esta sección pertenece a la parte superior de la Formación Wilcox.

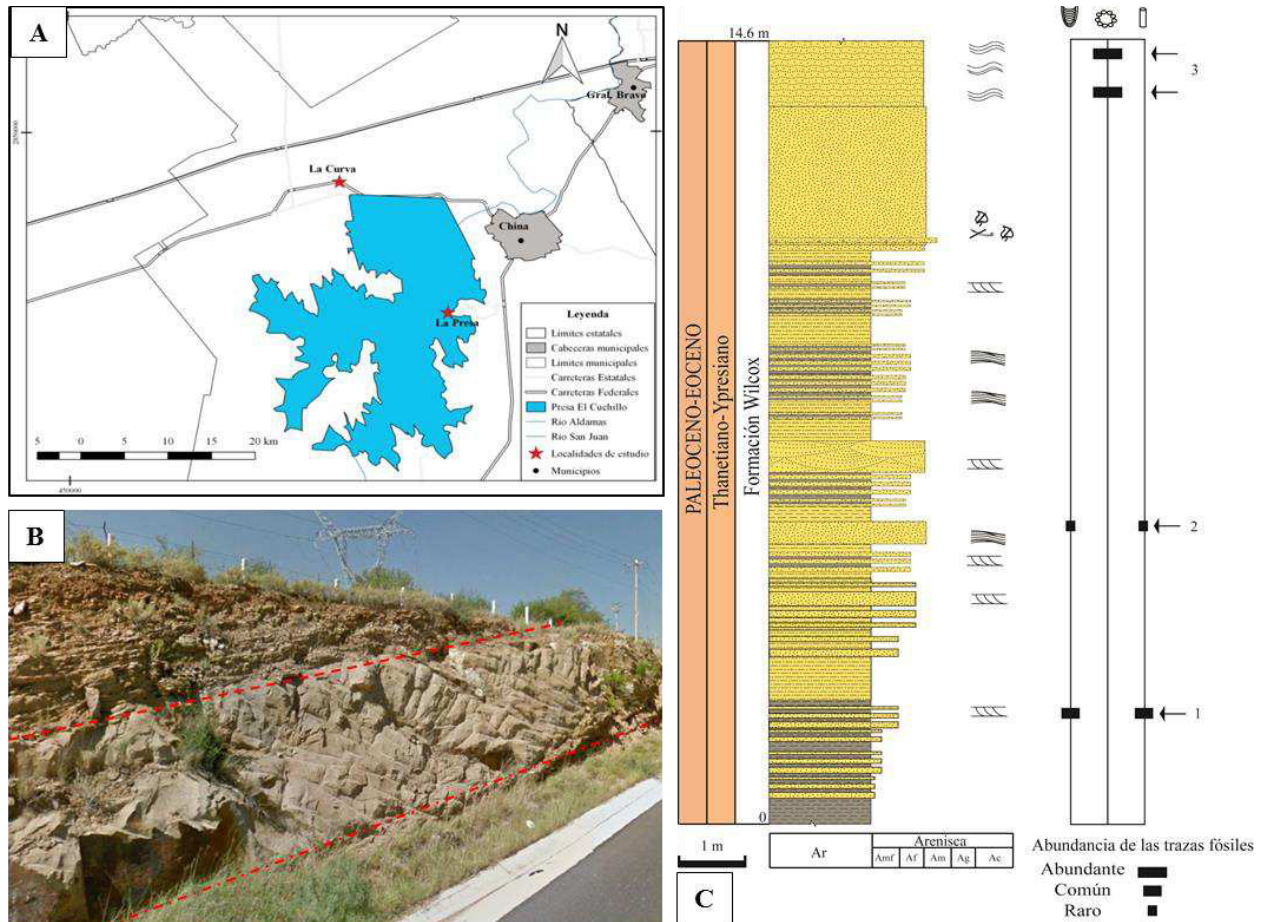


Figura 24. (A) Ubicación geográfica de la localidad “La Curva”. (B) Vista panorámica del área (25°44'06.59" N 99°20'33.99" O). (C) Sección estratigráfica de “La Curva”. El significado de la litología se encuentra en la figura 8 del capítulo 4.

4.4.1 Litofacies y petrografía

La sección medida tiene un espesor de 13.10 m (Figura 25 C). Está compuesta por intercalaciones de limolitas y pequeños paquetes de arenisca en la base, y de la parte media a superior se compone de arenisca masiva y paquetes de arenisca media. Se reconocieron 3 facies, las cuales se describen a continuación:

Litofacies Arm-g. Se compone de capas limolíticas intercaladas con capas de arenisca fina de 10 a 15 cm de espesor, con estratificación tipo *hummocky* y *swaley*. Se presentan *Skolithos* isp. y *Diplocraterion* isp., así como estructuras de biodeformación (moteados), el índice de bioturbación es bajo (IB=1). Esta facies se presenta en la parte inferior y media de la sección (Figura 26).

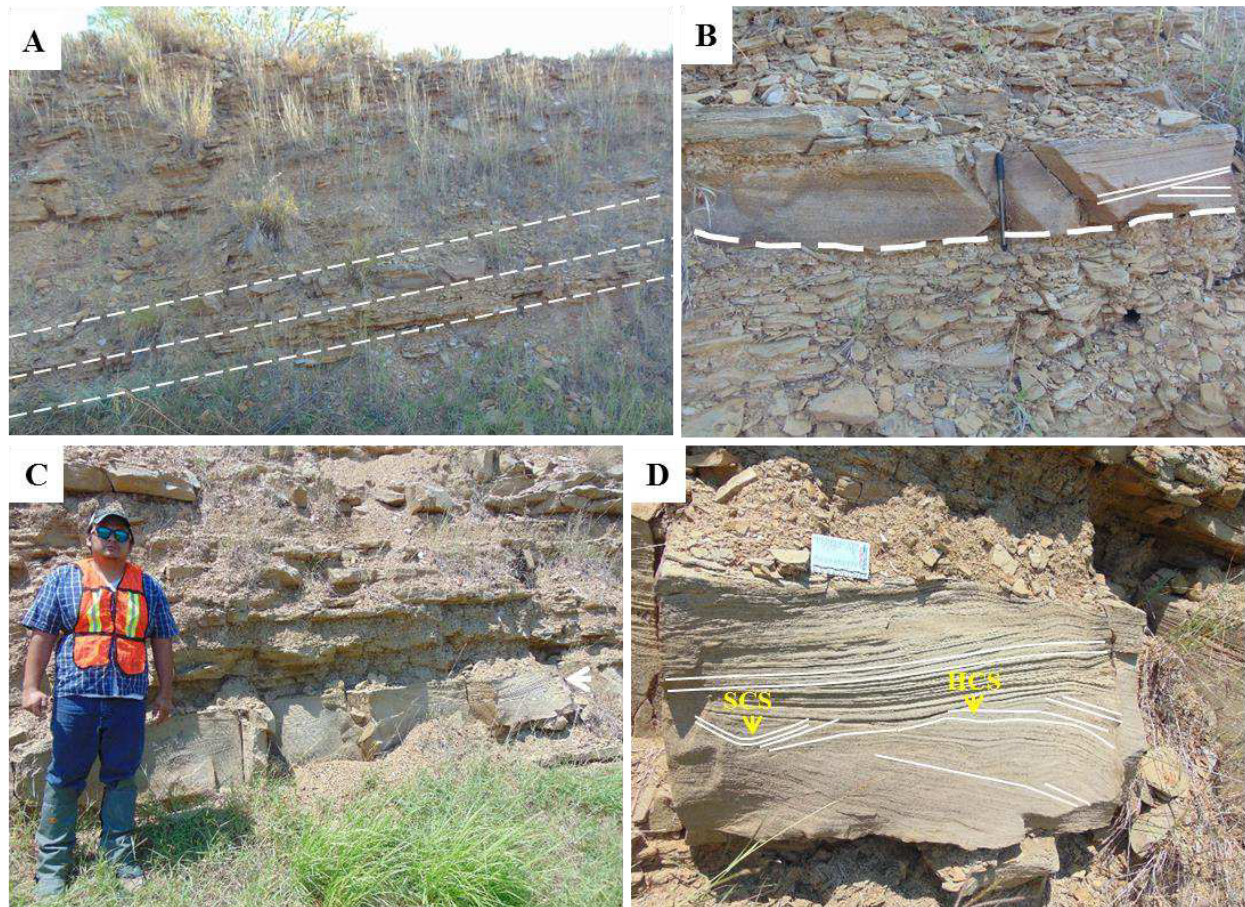


Figura 25. Imágenes de campo de la facies **B, LfArF**. (A) Intercalaciones de lutita y arenisca (la línea punteada indica los paquetes de arenisca con HCS y SCS). (B) Acercamiento de un estrato de arenisca con HCS y el límite con las capas de limolitas (Escala de la pluma 10 cm). (C) Paquete de 50 cm de espesor con HCS (flecha blanca) con capas de limolitas en la parte superior. (D) Acercamiento de la estratificación HCS y SCS (Escala=8 cm)

Litofacies AMv. Se trata de un paquete de 2.5 m de arenisca masiva color crema y sin estructuras sedimentarias internas la cual se va acuñando (Figura 26 A). En la base presenta una pequeña capa de conglomerados y restos vegetales (Figura 26 B). No contiene trazas fósiles, pero hay escasos moldes de bivalvos.

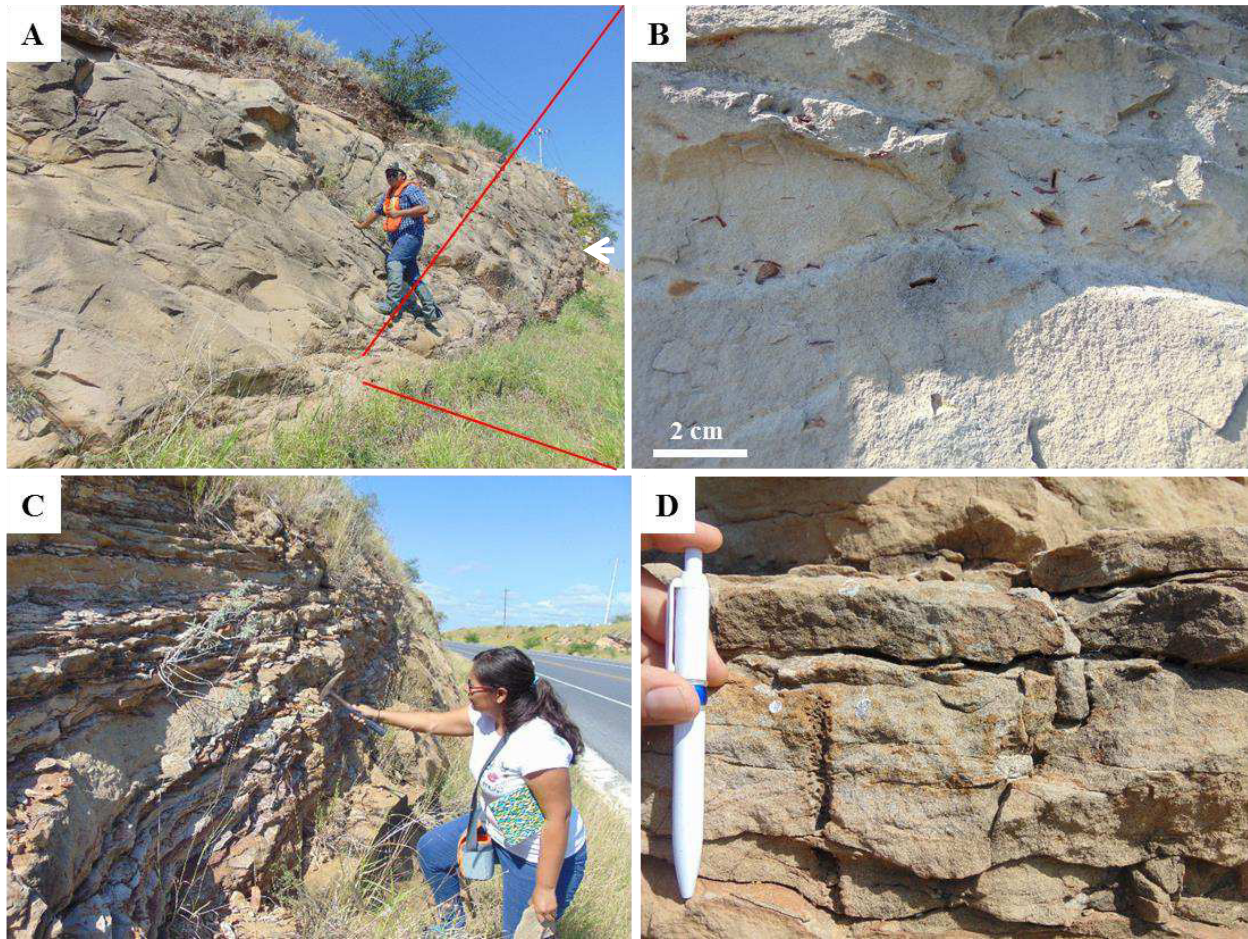


Figura 26. Imágenes de campo de la Facies G, Amv. (A) Estrato masivo de arenisca. (B) Acercamiento de la parte basal de la facies, con abundantes restos de plantas. (C) Estratos de arenisca con estratificación ondulada y con ondulitas en la superficie (D) Ejemplares de campo de *Ophiomorpha* isp., dentro de la facies D, Arf-m (Escala=9 cm).

Petrográficamente se compone de arenisca de grano medio bien seleccionada con clastos angulosos a subredondeados, presenta menos del 5% de matriz. El porcentaje de los componentes es similar entre el cuarzo (51.6%) y los feldespatos (45.6), los líticos son poco comunes (2.6%). Como minerales accesorios hay micas y circones (Figura 27). De acuerdo con sus componentes minerales se clasifica como feldespatoarenita (Apéndice 2)

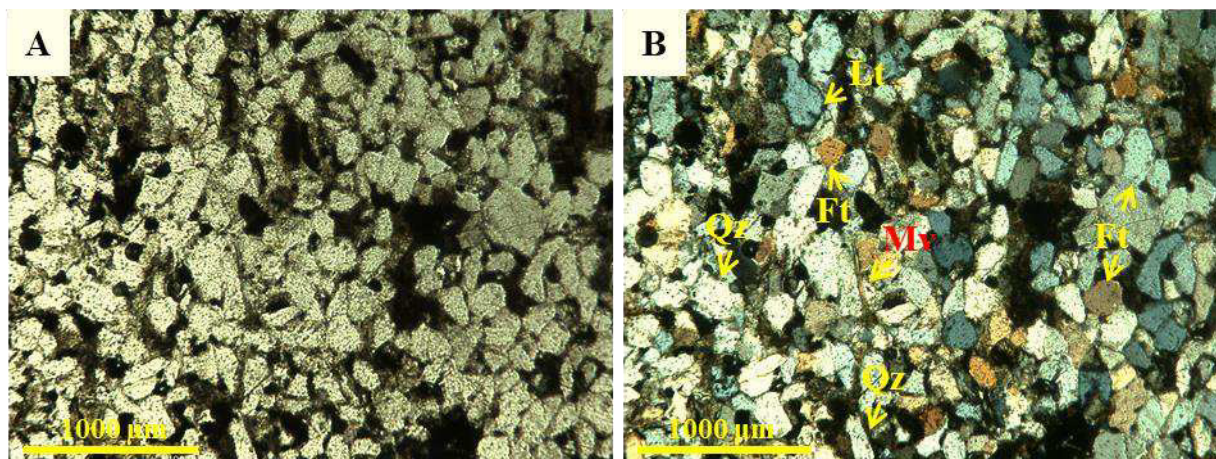


Figura 27. Lámina LC. (A) Lámina con nicoles paralelos, se observan los diversos componentes, cuarzo (Qz), feldspatos (Ft), moscovita (Mv). (B) Misma sección con nicoles cruzados, donde se distinguen los cuarzoes de los feldspatos (Ft) y con contactos longitudinales.

Litofacies Arf-m. Capas de arenisca media, en donde los contactos no están bien definidos; presentan estratificación ondulante en la base tiene un contacto neto con la litofacies AMv y en la superficie se observan ondulitas simétricas (Figura 26 C), posee colores crema que intemperizan a tonalidades oxidadas. El índice de bioturbación es bajo (IB=2), registrándose como único icnotaxón *Ophiomorpha* isp. (Figura 27 D).

4.5 La Presa

La sección medida y el material estudiado se localizan en la Presa el Cuchillo dentro del Municipio de China, N.L. (Figura 28 A y B), el cual representaría uno de los pocos afloramientos de la Formación Reklaw en la Cuenca de Burgos.

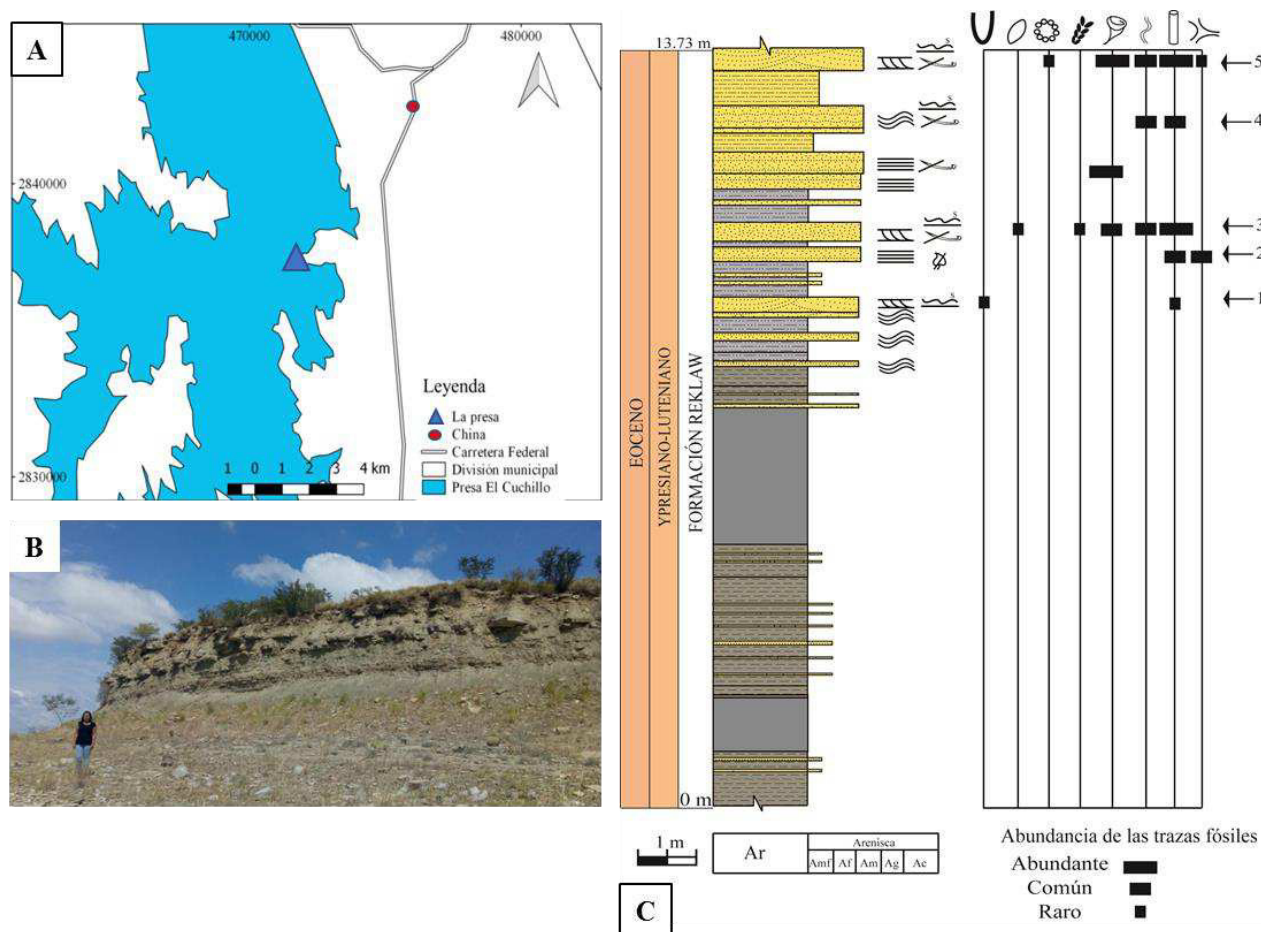


Figura 28. (A) Localización del área de estudio. (B) Vista panorámica de la sección medida. (C) Columna estratigráfica, sección La presa, se señalan los niveles con contenido fósil (tanto trazas fósiles como restos de fósiles) abundancia relativa e índice de bioturbación. El significado de la litología se encuentra en la figura 8 del capítulo 4.

4.5.1 Litofacies y petrografía

La sección fue medida a partir de la línea de agua, con un espesor de 13.73 m (Figura 28 C). De manera general está compuesta en la parte inferior por depósitos de lutita color verde oliva intercaladas con pequeños estratos de arenisca de 5 a 10 cm de espesor, la parte media se compone de intercalaciones de arenisca con pequeñas capas de limolitas, y hacia la parte superior las capas de arenisca son más grandes. Se reconocieron tres facies, su descripción y características se describen a continuación:

Litofacies LArf. Está caracterizada por 7 m de capas de lutita con intercalaciones de capas de arenisca fina lenticulares de 5 cm de espesor (Figura 29), los contactos son ligeramente erosivos. Hacia la superficie las capas de arenisca son más frecuentes y su espesor va aumentando. No hay presencia de trazas fósiles o fósiles corporales. Esta facies va pasando gradualmente a la litofacies Arf-m.

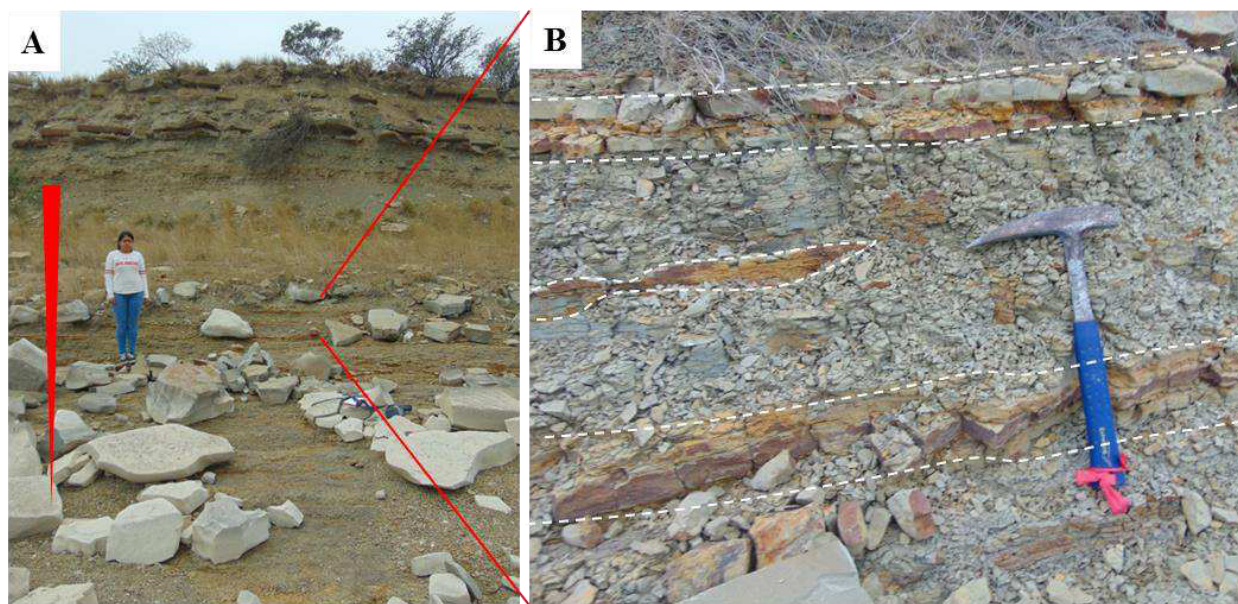


Figura 29. Litofacies LArf, (A) Vista panorámica de la parte inferior de la sección medida, la flecha roja indica el espesor de las capas de arenisca que van aumentando de espesor de la base hacia la superficie. (B) Detalle de las intercalaciones de lutita con pequeñas capas de arenisca, algunas se presentan como lentes (Línea punteada blanca).

Litofacies Arf-m. Contiene horizontes de arenisca fina a media de 10 a 15 cm de espesor (Figura 30 A), con estratificación cruzada planar y ondulitas en la superficie y base del estrato (Figuras B-D). Se presentan intercalaciones de limolitas las cuales van desaparecen hacia la superficie, los contactos son netos y ocasionalmente hay presencia restos de plantas. La bioturbación es variable, en la parte media inferior se presentan trazas fósiles de *Arenicolites* isp y *Skolithos linearis*, en la base de algunos estratos hay presencia de *Thalassinoides* isp (IB=1). Y en la parte media superior hay más presencia de trazas como: *Lockeia* isp., *Protovirgularia dichotoma*, *Rosselia* isp. *Skolithos* isp. y *Sinusichnus sinuosus*.

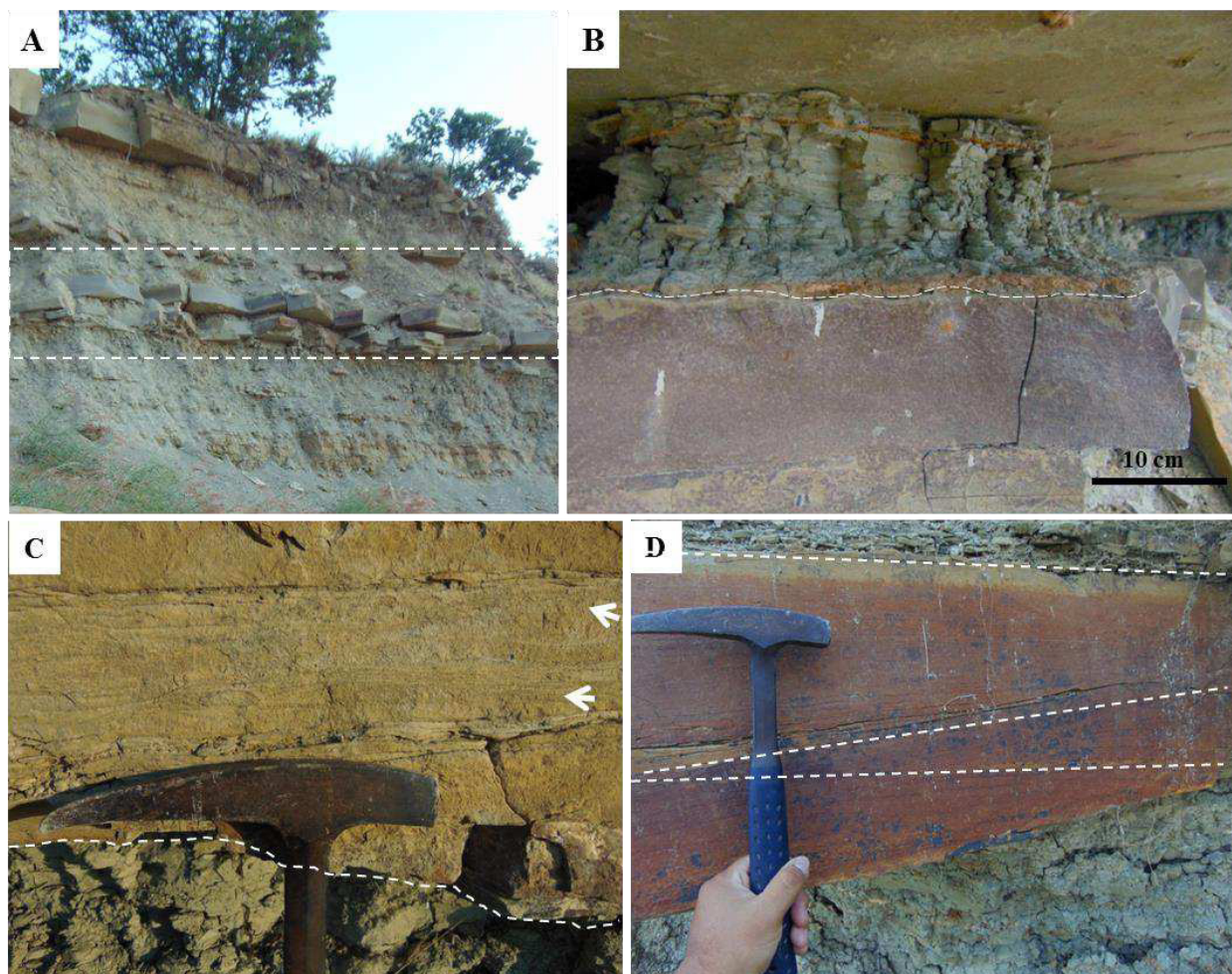


Figura 30. (A) Vista panorámica de donde se ubica la facies D, Arf-m. (B) Intercalaciones de arenisca y capas de limolitas con un contacto neto (Línea punteada blanca). (C) Estratificación interna ondulada (flechas blancas), por debajo hay lutitas (la línea punteada roja indica este cambio). (D) Capa de arenisca con estratificación cruzada de bajo ángulo (las líneas punteadas indican la inclinación de la estratificación).

Petrográficamente se compone de arenisca de grano fino y moderadamente seleccionada, con clastos redondeados a subredondeados, presenta 20 % de matriz. Los componentes principales son cuarzo (41.6%) y feldespatos (56.3), los líticos son poco comunes (2%), presenta contactos puntuales y longitudinales (Figura 32 A). Como minerales accesorios hay glauconita y en menor proporción micas. De acuerdo con sus componentes minerales se clasifica como feldespatoarenita (Apéndice 2)

Litofacies ArF. Se encuentra distribuida en la parte superior de la sección (nivel 4 y 5), consiste en arenisca fina a media, con estratificación cruzada de muy bajo ángulo, ligeramente ondulada, y en algunas ocasiones laminar, los contactos son netos entre las capas. En la superficie de las capas hay ondulitas simétricas que se van transformando a asimétricas, está distribuida en la parte superior de la columna, y presenta ocasionalmente restos de moldes de bivalvos, en esta facies hay más bioturbación, siendo las trazas fósiles horizontales las que dominan sobre las verticales (IB=3), se presentan: *Ophiomorpha nodosa*, *Rosselia* isp., *Skolithos linearis*, *Sinusichnus sinuosus* y *Thalassinoides*.

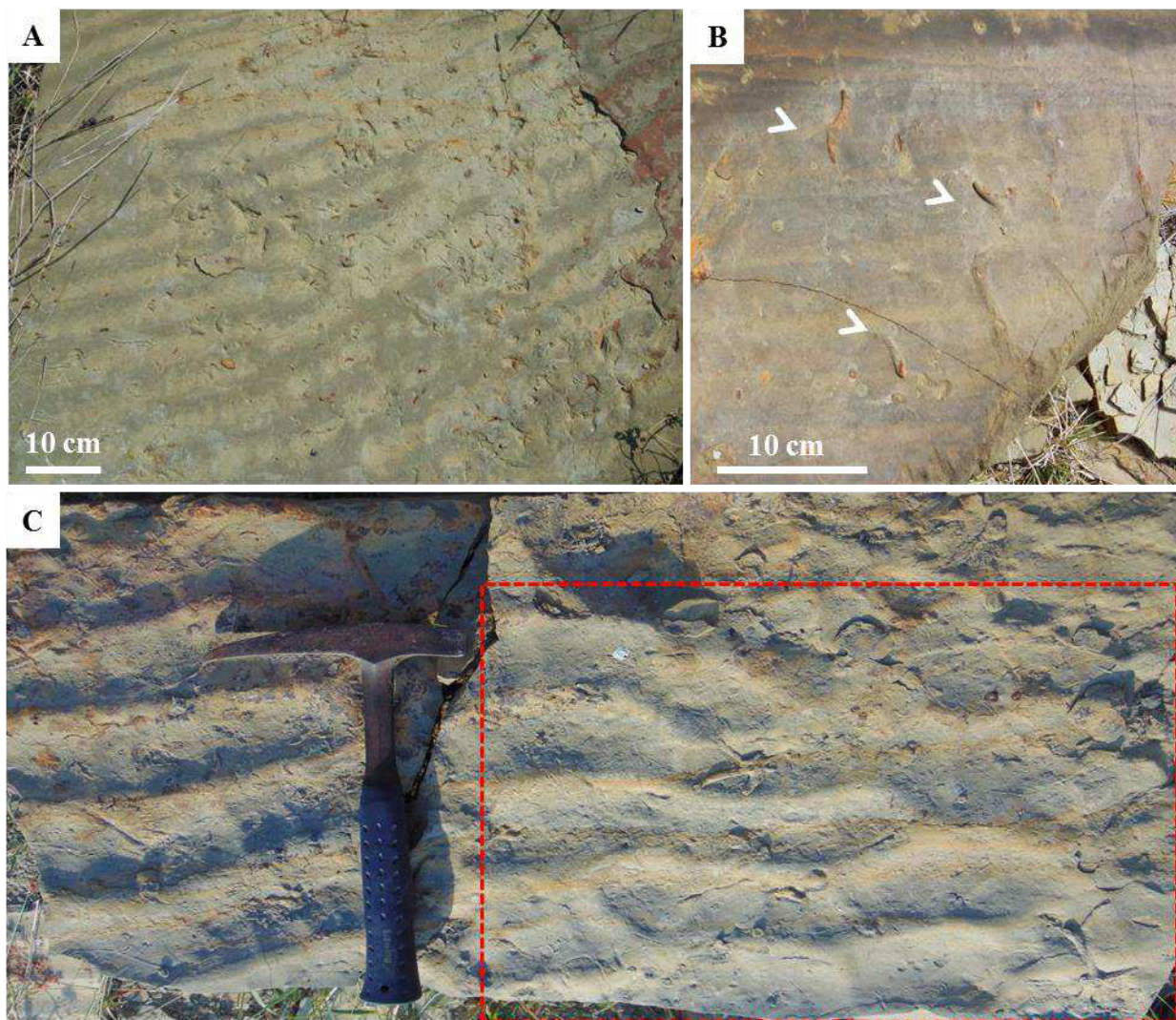


Figura 31. Litofacies ArF. (A) Ondulitas simétricas en la superficie del estrato, se localizan en el nivel 5 del afloramiento. (B) Corte transversal de una capa con trazas fósiles dentro de ella (Flechas blancas). (C) Ondulitas simétricas en el techo de la sección que van cambiando a ondulitas de interferencia (recuadro rojo).

Petrográficamente se compone de arenisca de grano fino y bien seleccionada, con clastos subredondeados, presenta 20 % de matriz. Los componentes principales son cuarzo (50.3%) y feldespatos (48.3), los líticos son poco comunes (4%), presenta contactos puntuales y pocos contactos longitudinales. Como minerales accesorios hay glauconita y en menor proporción micas (Figura 32 B). De acuerdo con sus componentes minerales se clasifica como feldespatoarenita (Apéndice 2).

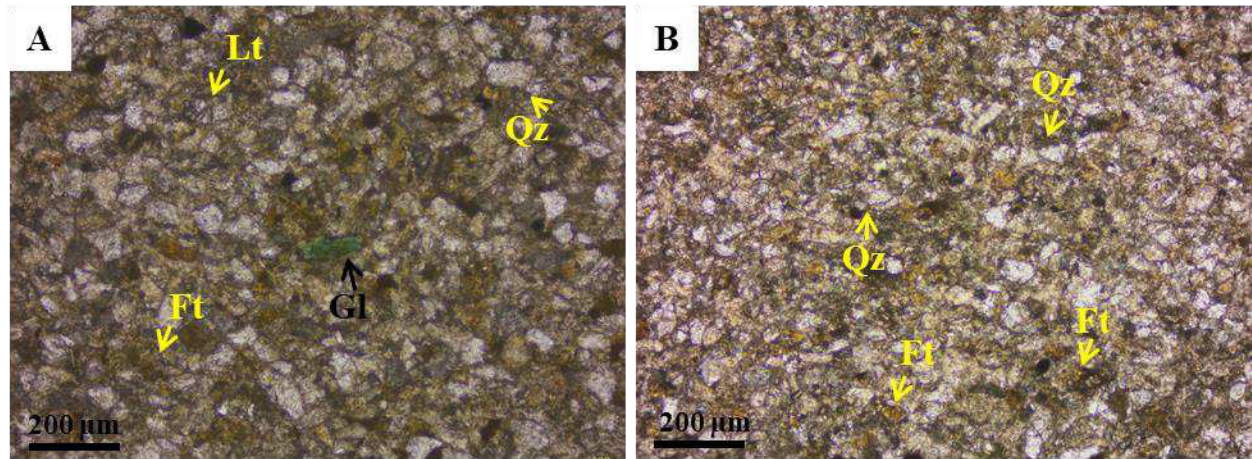


Figura 32. Láminas delgadas correspondientes a las litofacies Arf-m y ArF. (A) Lámina Bg 2, sección con nicols cruzados donde se diferencian los feldespatos (Ft) de los cuarzoes, hay presencia de glauconita (Gl) se observan contactos puntuales y con clastos angulosos. (B) Lámina Bg 1, Sección con nicols cruzados, donde los granos son más pequeños, presenta cuarzo (Qz) y feldespatos (Ft) principalmente.

4.6 Icnotaxonomía

Se identificaron trece icnogéneros dentro de las cuatro localidades estudiadas. La distribución, abundancia y diversidad de las trazas fósiles, es diferente en cada localidad, siendo San José de las Lajas y La Presa las localidades con mayor diversidad y abundancia (ocho icnogéneros en ambas localidades), (Tabla 4).

Tabla 4. Distribución y abundancia relativa de las trazas fósiles en las localidades de estudio. ER (El Rebaje); SJL (San José de las Lajas); LC (La Curva); LP (La Presa).

Ichnogéneros	ER	SJL	LC	LP
<i>Arenicolites</i>				
<i>Chondrites</i>				
<i>Diplocraterion</i>				
<i>Lockeia</i>				
<i>Rosselia</i>				
<i>Ophiomorpha</i>				
<i>Palaeophycus</i>				
<i>Planolites</i>				
<i>Psilonichnus</i>				
<i>Protovirgularia</i>				
<i>Sinusichnus</i>				
<i>Skolithos</i>				
<i>Thalassinoides</i>				

Abundancia

Escaso	Moderado	Abundante

Ichnogénero *Arenicolites* Salter 1857

Ichnoespecie tipo *Arenicola carbonaria* Binney, 1852 (Richter 1924)

Diagnosis. Galerías verticales simples en forma de U, con aperturas superiores (diagnosis enmendada por Rindsberg y Kopaska-Merkel (2005).

Arenicolites isp.

(Figura 33)

Descripción. Se trata de un tubo vertical en forma de U, sin presencia de un *spreite* (Figuras 33 A y B). Se encuentra conservado en relieve completo dentro del estrato (Figura 33 B), el sedimento que contiene a la traza es de arenisca fina, así como el relleno de esta. Mide 3.2 de largo y el diámetro de los tubos es de 2 mm. Los tubos se van ensanchando ligeramente hacia la superficie, la parte inferior de la traza es curvada y muy estrecha.

Distribución. La Presa, nivel 1, Formación Reklaw (Ypresiano-Lutetiano).

Discusión. El ejemplar presenta la típica forma de U del ichnogénero *Arenicolites*, pero no se puede asociar a una ichnoespecie particular debido a que se encuentra pobremente preservado. Se han reportado 15 ichnoespecies de *Arenicolites*, muchas de ellas pendientes de una revisión minuciosa (Knaust, 2017) . Los criterios de diferenciación incluyen: ramificación secundaria (*A. carbonarius*) y orientación de las extremidades (vertical en *A. sparsus*, la ichnoespecie más característica; inclinada en *A. curvatus*; variable en *A. variabilis*; suhorizontal en *Arenicolites. longistriatus*) y presencia o ausencia de un revestimiento o pared. Ha sido interpretada como estructura de alimentación (Fodinichnia), probablemente producida por insectos, poliquetos y crustáceos (Rindsberg y Kopaska-Merkel, 2005).

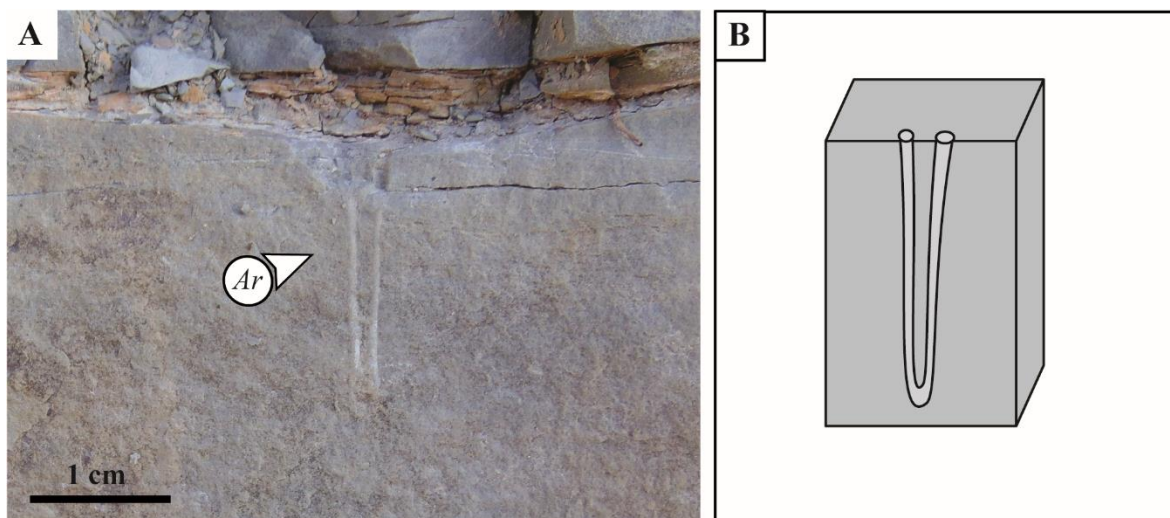


Figura 33. (A) *Arenicolites* isp. (Ar); (B) Esquema de *Arenicolites* isp. y su preservación dentro del sustrato.

Iconogénero *Chondrites* von Stenberg, 1833

Iconoespecie tipo. *Fucoides antiquus* Brongniart, 1828

Diagnosis. Sistemas dendríticos, con paredes lisas, pequeñas madrigueras que regularmente se ramifican, normalmente no se interconectan o interpenetran. El diámetro de los componentes dentro del sistema permanece constante (enmendada por Pemberton y Frey, 1984).

Chondrites cf. *intricatus*

(Figura 34)

Descripción. Sistema de galerías con un solo orden de ramificación, el ángulo de las ramificaciones es agudo y varía de 50° a 65°. Las paredes son lisas el largo máximo es constante de 2.5 cm y el ancho de las estructuras es de apenas 0.05 cm, el relleno de las trazas es más claro que la roca hospedante. Conservado en hiporrelieve y en la base del estrato sobre arenisca fina. Se encuentra en asociación con *Ophiomorpha* cf. *nodosa* y *Ophiomorpha* isp.

Distribución. Localidad el Rebaje, Rancho Chirinos y San José de las Lajas, Nivel 5 FW (Selandiano-Ypresiano).

Discusión. *Chondrites* posee múltiples morfologías, razón por la cual se han descrito alrededor de 150 especies, Fu (1991) hizo una revisión del icnogénero reduciéndolo a solo cuatro especies válidas: *C. intricatus*, *C. targionii*, *C. bollensis*, y *C. patulus*. La traza descrita tiene similitudes con la icnoespecie *C. intricatus*, ya que las galerías y ramificaciones son tenues y delgadas (Figuras 34 A y C), y a pesar de que el ángulo es agudo, las ramificaciones tienen más de 40° de amplitud. En algunos casos las trazas reconocidas no se aprecian con claridad debido a que se encuentran encimadas unas sobre otras. Sin embargo, una característica principal de *C. intricatus* es que posee ramificaciones rectas, con una orientación inclinada casi horizontal y en distintas direcciones (Uchman, 1999). Las trazas reconocidas de la Localidad San José de las Lajas *C. cf. intricatus* (Figuras 34 C y D) se encuentra en asociación con *C. targionii*, caso que es muy común dentro del registro de *Chondrites*. *C. cf. intricatus*, en esta localidad se puede distinguir por su pequeño tamaño, túneles comunes y rectos que se orientan en todas las direcciones, y por el pequeño ángulo de ramificación (Monaco y Checconi 2008). En ambientes transicionales también se han reconocido en bahías interdistributarias (Archer y Maples, 1984), en frentes deltaicos distales y prodelta (MacEachern *et al.*, 2005; Pemberton *et al.*, 2007).

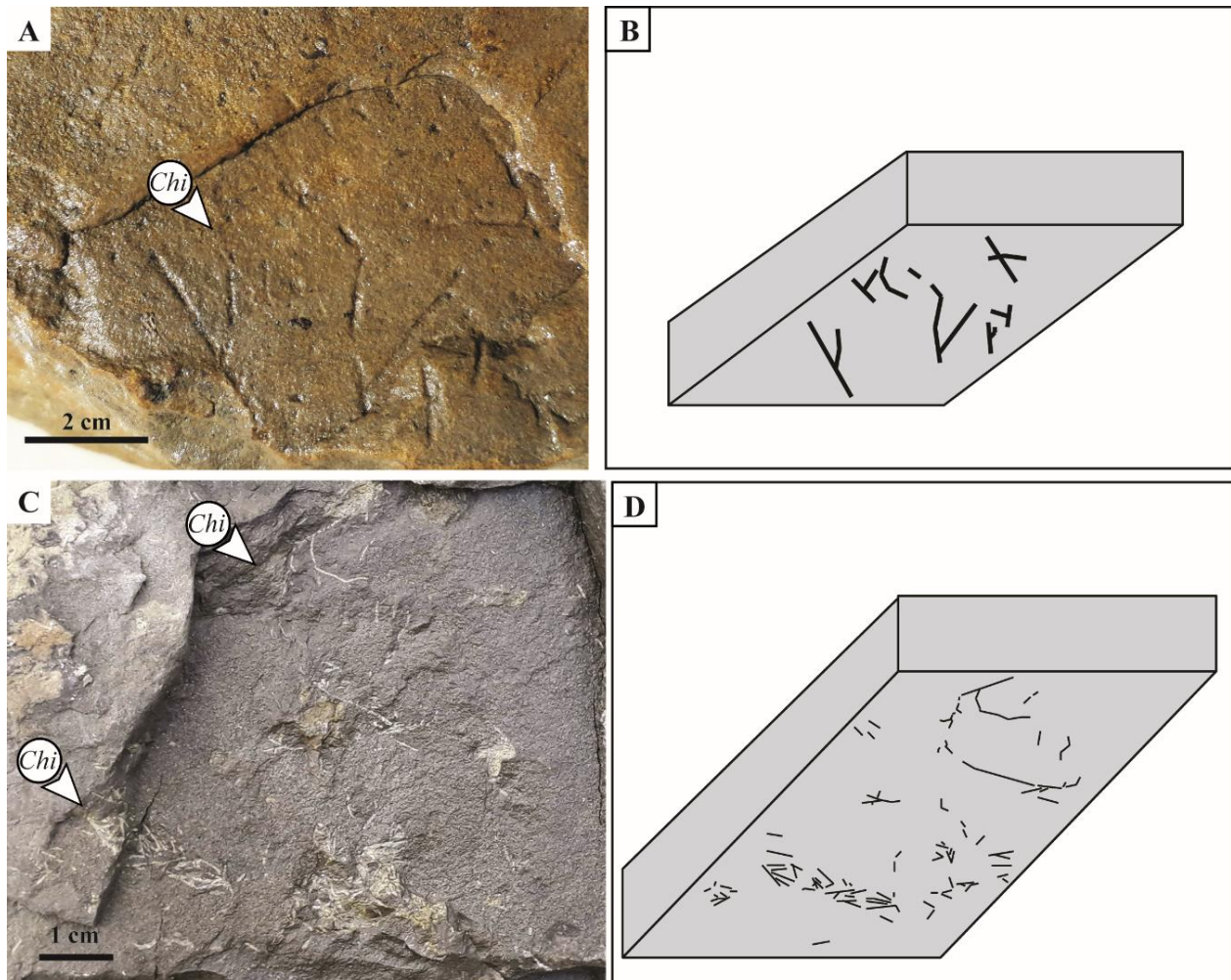


Figura 34. *Chondrites* cf. *intricatus* en El Rebaje. **(A)** *Chondrites* cf. *intricatus*, preservado en la base del estrato y en arenisca, se observan las ramificaciones típicas del icnogénero. **(B)** Esquema de *C.* cf. *intricatus* y su modo de preservación. **(C)** *C.* cf. *intricatus* con las galerías encimadas unas sobre otras. **(D)** Posición de *C.* cf. *intricatus* dentro del sustrato.

Chondrites targonii Brongniart, 1828

(Figura 35)

Diagnosis. Se caracteriza por tener ramificaciones sucesivas primarias bien definidas, que suelen ser ligeramente curvas. El ángulo de ramificación suele ser agudo. La mayoría de los túneles son de unos pocos milímetros de ancho (Uchman, 1999) .

Material analizado. Cuatro ejemplares colectados.

Descripción. Trazas horizontales en forma de raíces y con un patrón dendrítico, ligeramente curvadas (Figuras 35 A y B). Las ramificaciones no se interconectan, ni se interpenetran, poseen un ángulo de 30 a 35°. Las ramificaciones primarias tienen un largo de 2.5 a 3 cm, y las secundarias 2 a 2.5 cm; el ancho es de 1 mm, las son paredes lisas. El relleno es de sedimento más fino y de color más claro en comparación con la roca hospedante que es arenisca de grano medio (Figura 35 A). Se conservan en hiporrelieve, sobre la base del estrato. Se encuentra asociada con *Chondrites* cf. *intricatus* y *Skolithos* isp.

Distribución. San José de las Lajas, nivel 1 y 5, FW (Thanetiano-Ypresiano).

Discusión. Las trazas analizadas muestran una fuerte relación con la diagnosis de *Chondrites targonii*, la cual posee un solo sistema de ramificaciones y ligeramente curvadas y ángulo agudo. La única diferencia es el relleno de las trazas, el cual comúnmente es oscuro (Monaco, 1995; Seilacher, 2007; Uchman, 1999). Estas trazas de fósiles se interpretan como rastros y trampas agrícolas (Agrichnia), (Fu, 1991; Bromley, 1996), estructuras de alimentación de animales vermiformes (Vossler y Pemberton 1989; Frey y Howard 1990) y quimiosimbiontes (Buatois y Mángano, 2011).

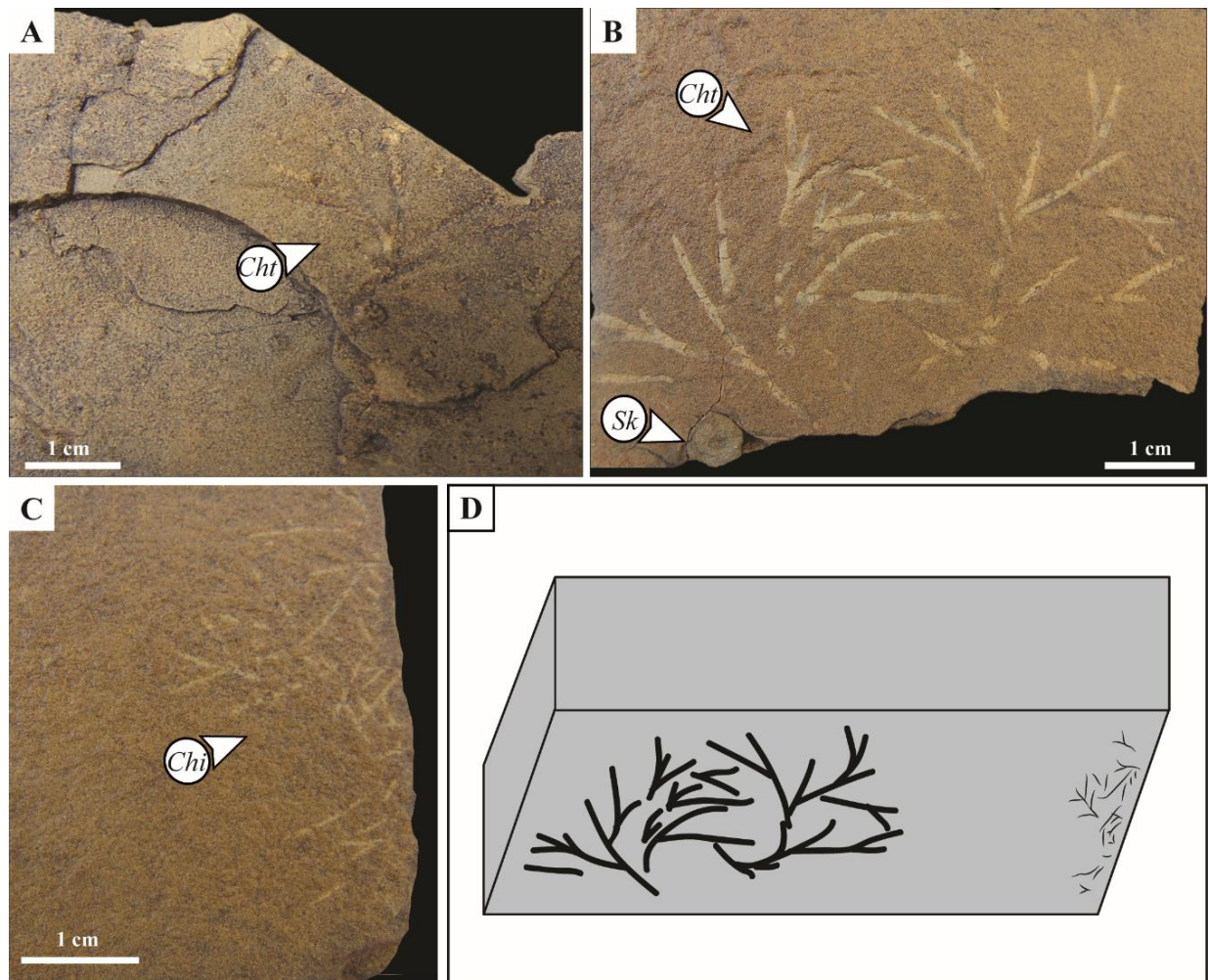


Figura 35. *Chondrites* de la Localidad San José de las Lajas (A) *Chondrites targonii*, mal preservado, se observa ligeramente el relleno de la traza. (B) *Chondrites targonii*, se conserva sobre la base del estrato, se aprecia con detalle la ligera curvatura de las ramificaciones. (C) *Chondrites* cf. *intricatus*. (D) *Chondrites targonii* y *Chondrites* cf. *intricatus* y su posición dentro del sustrato.

Ichnogénero *Diplocraterion*

Ichnoespecie tipo. *Diplocraterion parallelum* Torell, 1870

Diagnosis. Tubos en U con dos extremidades paralelas y un *spreite* unidireccional (enmendada por Fürsich, 1974).

Diplocraterion isp.

(Figura 36)

Descripción. Trazas que se observan en vista de planta, están relacionadas dos círculos los cuales se relacionan en una forma tipo mancuerna (Figura 36 B), en sección transversal el spreite se ve muy tenue (Figura 36 A). El diámetro de los círculos es de 0.4 cm y el ancho es de 2 cm, y la longitud es de 4.5 cm. Se encuentra conservada como epirelieve y como relieve completo, se encuentran dentro de arenisca fina.

Distribución. San José de las Lajas, nivel 6, Formación Wilcox (Selandiano-Ypresiano) y La Curva

Discusión. Los ejemplares observados se asignan solo a nivel de icnogénero, debido a que el característico *spreite* no se observa con detalle. Sin embargo, en vista de planta se aprecian con detalle las terminaciones superficiales de la traza. En la localidad de “La Curva”, también se asignan a nivel de icnogénero, debido a que pesar de observarse con detalle el característico *spreite* (Figura 36 E), no está bien conservada la traza. Las estructuras en epirrelieve se aprecian con más detalle las terminaciones superficiales de la traza (Figura 36 C). Este icnogénero se ha asociado con estructuras de domicilio (Domichnia) producto de la actividad de organismos suspensívoros y depositívoros (Fürsich 1974; Seilacher 2007). La presencia de la estructura llamada *spreite*, se relaciona con la construcción de la galería, en donde el movimiento del organismo productor es hacia abajo o hacia arriba, con respecto a la interfaz agua-sedimento, y éste es controlado por la erosión o acumulación del sedimento (Goldring 1964; Leaman y McIlroy, 2017). Este icnogénero es producido por organismos vermiformes como anélidos (Ekdale y Lewis, 1991) o crustáceos anfípodos (Gingras *et al.* 2008) y artrópodos (Dashgard *et al.*, 2017). Ambientalmente se ha reportado en zonas intermareales de alta energía (Mángano y Buatois, 2004), en zonas de *nearshore* (Gaillard y Racheboeuf, 2006) y en ambientes transicionales como deltas y estuarios (Gingras *et al.*, 1999).

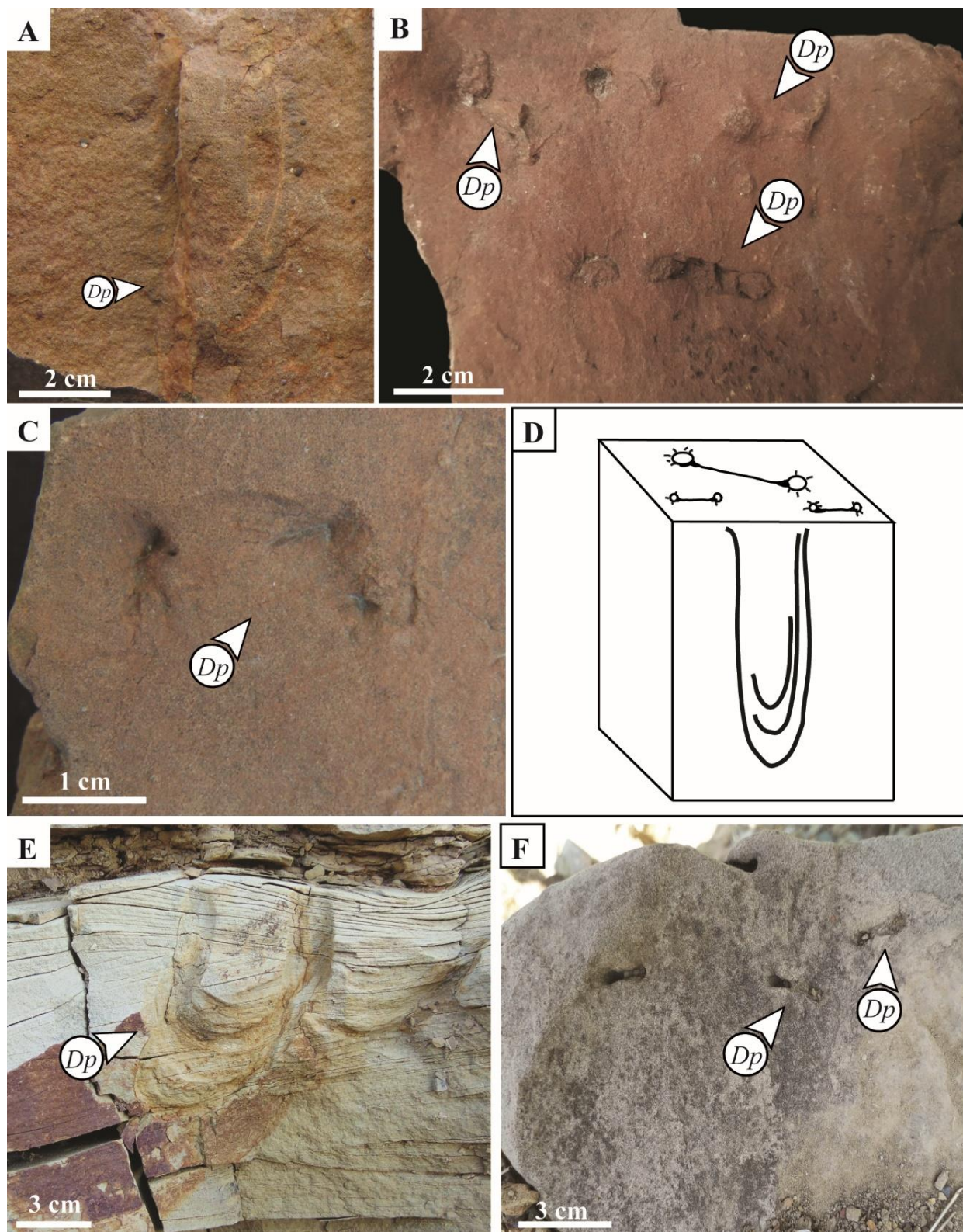


Figura 36. (A) Galerías de *Diplocraterion* isp (*Dp*). en posición vertical, el *spreite* ligeramente se observa. (B-C) *Diplocraterion* isp. (*Dp*), en vista de planta, se observa con claridad las aperturas (Flecha blanca). (D) Representación esquemática de *Diplocraterion* isp. dentro del

sustrato. Galerías en “La Curva” (E) *Diplocraterion* isp. (Dp) en posición vertical y conservada en relieve completo. (F) Galerías pequeñas de *Diplocraterion* isp., conservadas en epirrelieve.

Ichnogénero *Lockeia* James 1879

Ichnoespecie tipo. *Lockeia siliquaria* James 1879

Diagnosis. Traza con simetría bilateral, alargada, con forma de almendra, forma de corazón, forma de mancuerna o rara vez triangular, con el margen liso; predominantemente preservado en formas aisladas o en montículos alineados en hiporrelieves; segmentos individuales distintos comúnmente con una cresta mediana. Pueden estar presentes formas onduladas (enmendado por Schlirf *et al.*, 2001).

Lockeia isp.

(Figura 37)

Descripción. Traza en forma ovalada, las terminaciones de la traza están ligeramente alargadas con 1 cm de largo mayor y 0.5 de ancho. Se encuentra conservada en epirrelieve positivo y en posición horizontal al estrato que la contiene, se conserva en arenisca (Figura 37).

Distribución. La Presa nivel 3, F.R. (Ypresiano-Lutetiano).

Discusión. Debido a su preservación no se pueden observar las estructuras distintivas de alguna ichnoespecie de *Lockeia*, razón por la cual solo se asigna a nivel de ichnogénero. Se encuentra en asociación con el ichnogénero *Protovirgularia* (Figura 37 A), estas asociaciones han sido bien documentadas en registros del Fanerozoico (Maples y West, 1989; Ekdale y Bromley, 2001; de Gibert y Domenech, 2008; Carmona *et al.*, 2010). El ichnogénero *Lockeia* ha sido objeto de diversas interpretaciones, asignándose nuevas especies, en donde muchas de ellas, dada su preservación, se han considerado como formas intermedias (Schlirf *et al.*, 2001). Las características distintivas del ichnogénero son la forma típica ovalada o de almendra, la terminación ovalada en forma puntiaguda, un surco medio en la traza y su modo de preservación. El ichnogénero está ampliamente distribuido en el Fanerozoico, y ha sido interpretado como una

traza realizada por bivalvos en sustratos suaves (Seilacher y Seilacher, 1994; Mángano *et al.*, 1998). Según su clasificación etológica se asigna a cubichnia, pues representa estructuras de reposo (Osgood, 1970; Häntzschel, 1975), y se ha asociado a la Icnofacies de *Cruziana* (MacEachern y Gingras, 2007; Paranjape *et al.*, 2013) y la icnofacies de *Psilonichnus* (Frey y Pemberton, 1987; Marshall, 2003; Nesbitt y Campbell, 2006).

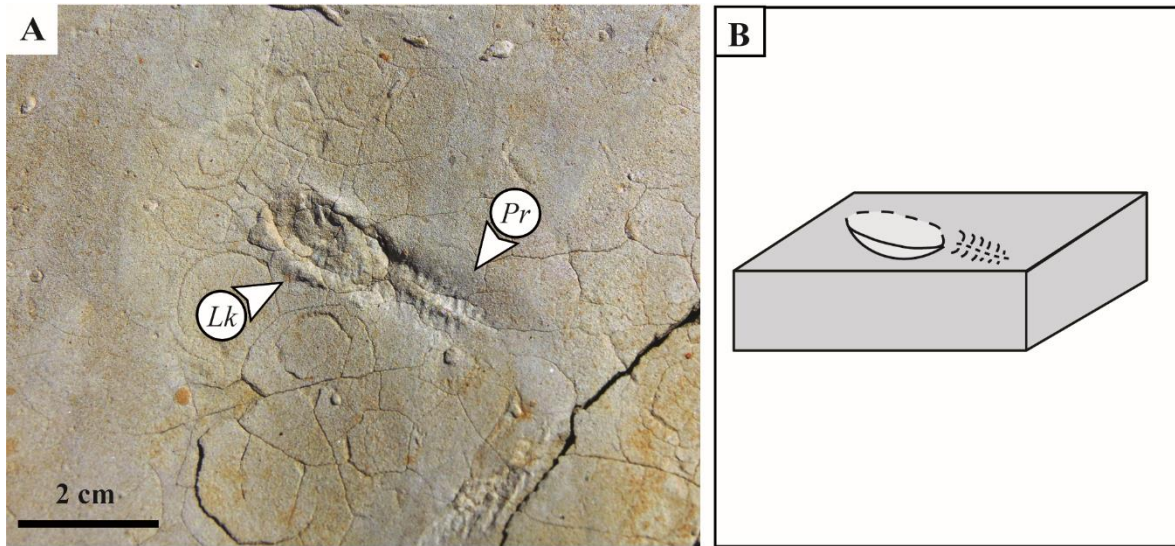


Figura 37. (A) *Lockeia* isp. (Lk) y *Protovirgularia dichotoma* (Pr); (B) Esquema de *Lockeia* isp y *Protovirgularia dichotoma*, y posición dentro del sustrato.

Ichnogénero *Rosselia* Dahmer, 1937

Ichnoespecie tipo. *Rosselia socialis* Dahmer, 1937

Diagnosis. Traza cilíndrica rellena de sedimento fino, rodeada por una pared gruesa compuesta de láminas concéntricas. Generalmente con una morfología de embudo (Enmendado por Nara, 1995).

Rosselia isp.

(Figura 38)

Material analizado. Tres ejemplares colectados y diversos ejemplares en campo.

Descripción. Trazas cónicas, con un relleno arcilloso e irregular en la mayoría de los casos (Figuras 38 A y B). La posición es vertical a subvertical, y se encuentra conservada en relieve completo. En los casos que comprenden un eje central bien definido está relleno también de arcilla (Figuras 38 D y F). El diámetro de los conos oscila entre 1.5 cm y 2 cm. La altura varía entre 2 cm y 5 cm. Se encuentra en asociación con *Lockeia* isp., *Ophiomorpha nodosa*, *Protovirgularia dichotoma*, *Sinusichnus sinuosus*, *Skolithos linearis* y *Thalassinoides* isp.

Distribución. La Presa niveles 3 y 5, F.R. (Ypresiano-Lutetiano).

Discusión. Los ejemplares analizados se asignan al icnogénero *Rosselia* isp., por la forma típica de embudo, y por poseer un tubo central con un relleno de láminas concéntricas en la depresión del embudo. En algunos ejemplares la parte más angosta de la traza se ve difusa, esto probablemente debido a un efecto diagenético en relación con la cohesividad del sustrato (Figura 38 A). Las laminaciones alrededor del núcleo de estas trazas se ha determinado que posiblemente reflejan la actividad de como un organismo depositívoro procesa los sedimentos (Frey y Howard, 1985). Este icnogénero se ha considerado como una estructura de vivienda (Domichnia), en donde la forma de embudo sirve como depósito y almacenamiento de sedimentos (Frey y Howard, 1990). Como posibles productores de estas trazas se han relacionado con la actividad de poliquetos terebélicos que se alimentan de detritus (Nara 1995, 2002). *Rosselia* es una traza típica de ambientes marinos (Frey y Howard 1985, 1990; Vossler y Pemberton, 1989); también se ha reconocido en ambientes transicionales como estuarios (Gingras *et al.*, 1999) y deltas (MacEachern *et al.*, 2005).

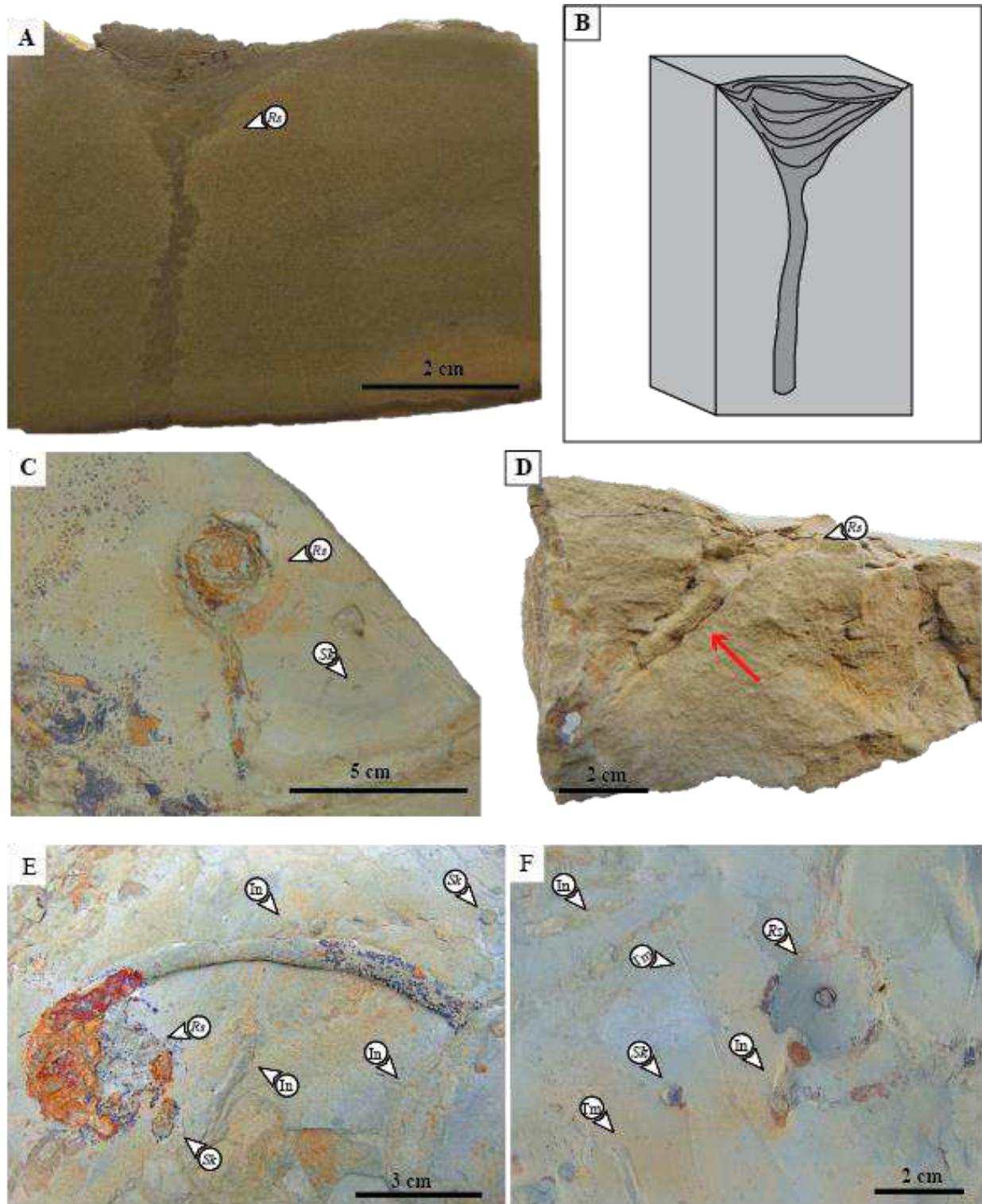


Figura 38. Trazas de *Rosselia*. (A) *Rosselia* isp., en corte transversal donde se muestra el relleno más fino que la roca hospedante. (B) Esquema de *Rosselia* isp. y su posición dentro del sustrato. (C) Vista de planta de *Rosselia* isp. (D) *Rosselia* isp. en corte transversal y su posible relación con *Skolithos linearis*. (E-F) *Rosselia* isp. con diferentes modos de preservación asociada con *Skolithos linearis* (Sk) y trazas indeterminadas (In).

Ichnogénero *Ophiomorpha* Lundgren, 1891

Ichnoespecie tipo. *Ophiomorpha nodosa* Lundgren, 1981

Diagnosis. Sistema de galerías simple a complejo, revestida por una aglutinación de pellets de sedimento. La pared es más o menos lisa interiormente densamente a escasamente nodosa en el exterior. Los pellets pueden ser individuales o en masa, tienen diferente forma: discoidales, ovoides, bilobados o irregulares. Las características de la pared pueden variar entre ejemplares (Frey *et al.*, 1978).

Ophiomorpha nodosa Lundgren, 1891

(Figura 39)

Material analizado. 1 ejemplar en campo.

Descripción. Galería con un revestimiento de pellets redondos (Figura 39 A, flecha azul), con ramificaciones en forma de Y, el ancho de la traza va de 1.8 cm en su parte más estrecha a 5 cm en (Figura 39 A, flecha roja), y el largo máximo es de 28.6 cm. Las ramificaciones tienen un diámetro de 2 cm y las ramificaciones secundarias de 1 cm de diámetro están pobremente preservadas (Figura 39 A, flecha amarilla). El relleno de la traza es activo y es el mismo que la roca hospedante, está oxidado por intemperismo y se conserva como relieve completo en posición vertical (Figura 38 B). Los pellets se observan redondos y sin deformación. Se encuentra en asociación con *Lockeia* isp., *Protovirgularia dichotoma*, *Rosselia* isp., *Sinusichnus sinuosus*, *Skolithos linearis* y *Thalassinoides* isp.

Distribución. La Presa, Nivel 5, F.R. (Ypresiano-Lutetiano).

Discusión. Estas trazas se asignan a nivel de especie, se presenta una galería que tiene en la pared el típico revestimiento de pellets redondeados y bien definidos. También se presenta como un sistema de galerías interconectadas (Figura 39). Las ramificaciones en este ichnogénero han sido bien documentados (p.ej. Bromley y Frey, 1974; Carmona y Buatois, 2003; Gibert *et al.*, 2006; Lowemark *et al.*, 2016), y se preservaron en las aquí descritas, las cuales en los puntos de

bifurcación hay un engrosamiento (Figura 39 A, flecha roja), se ha interpretado que servirían para que el organismo productor al batir los apéndices, se formen corrientes de agua necesarias para alimentarse y producir aireación en la excavación (Frey *et al.*, 1978; Carmona y Buatois, 2003), razón por la cual el organismo necesita lugares más amplios dentro de la galería para dar vuelta y cambiar de dirección durante su locomoción (*turn arounds*). Las ramificaciones secundarias que se observan en la traza descrita (Figura 39 A, flechas amarillas). Se ha propuesto que son construidas por los organismos cuando una madriguera normal se trunca repentinamente y es tapada por el organismo, formando un nuevo cuello de abertura en la parte lateral de la madriguera principal (Frey *et al.*, 1978) (Figura 39). Como posible organismo productor de *Ophiomorpha* se ha atribuido a crustáceos decápodos del género *Callinasa* (Dworschak, 2000).

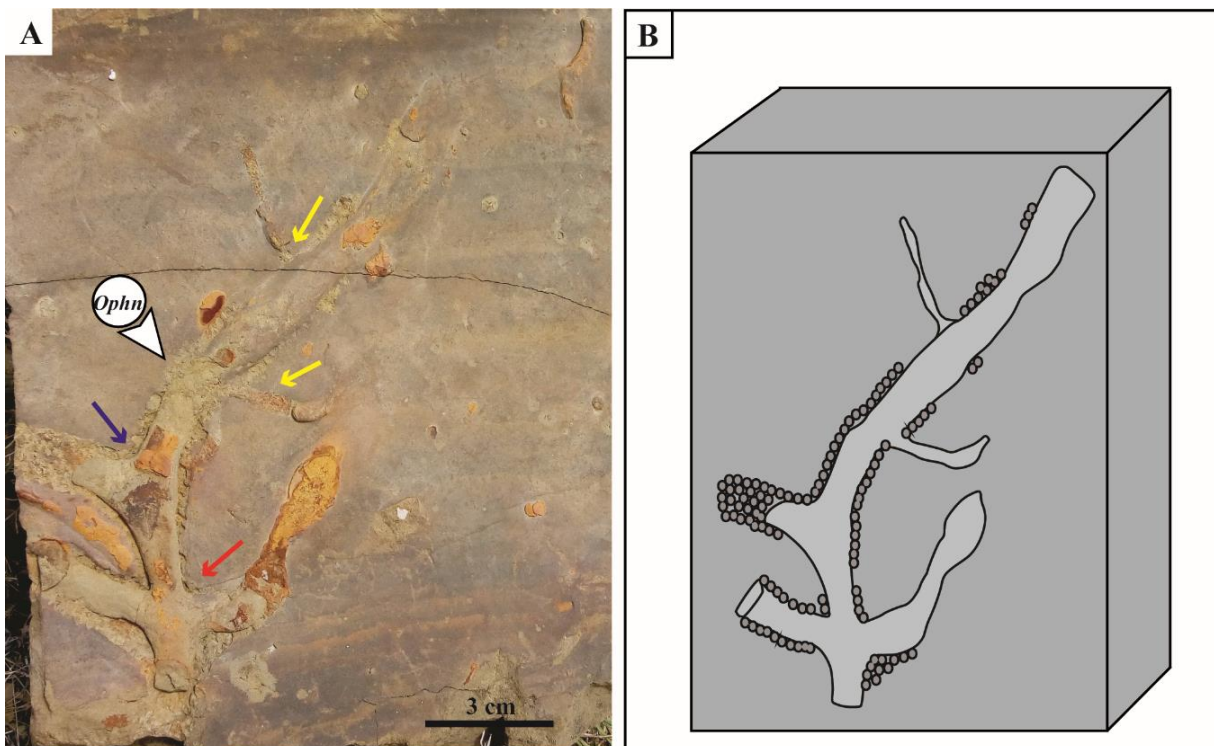


Figura 39. (A) *Ophiomorpha nodosa* con los pellets bien conservados (B) Esquema de *Ophiomorpha nodosa* dentro del sustrato.

Ophiomorpha cf. nodosa

(Figura 40)

Material analizado: Tres ejemplares, dos colectados y uno en campo.

Descripción: Galerías horizontales y verticales (Figura 40 A y C). Las dimensiones son de 8 a 5 cm de longitud, y diámetro de 0.5 a 1 cm. Paredes externas con moldes de pellets, pobremente definidos y circulares a irregulares de color oxido, (Figura 40 E y F), se conservan en relieve completo. Se encuentra en asociación con *Chondrites cf. intricatus* y *Ophiomorpha* isp.

Distribución. Rancho Chirinos.

Discusión. Debido a que la morfología de los pellets y la matriz cementante en la pared de las galerías son caracteres distintivos en los ophiomorphidos, las trazas descritas se asignan con duda a la icnoespecie *Ophiomorpha nodosa*, por presentar, aunque pellets mal conservados, presentan una pared en la que se distinguen éstos (Figura 40 A y C), la matriz es de arenisca y se encuentra muy oxidada (Figura 40 A). A pesar que, esta icnoespecie es común en depósitos de diferentes batimetrías (Uchman, 2009), *Ophiomorpha nodosa* es una traza común en ambientes someros marino-marginales para el Mesozoico y Cenozoico (p. ej. Gibert y Martinell, 1993; Pollard *et al.*, 1993; Buatois *et al.*, 2016; Lowemark *et al.*, 2016), relacionados a la línea de costa (*nearshore*), lagunas, barras, planicies de marea (Gibert *et al.*, 2006); frecuentemente asociada a la icnofacies de *Skolithos*. Estas trazas representan galerías de vivienda (Domichnia) relacionada como posibles productores a crustáceos decápodos (Frey *et al.*, 1978; Dworschak, 2000; Dworschak *et al.*, 2012).

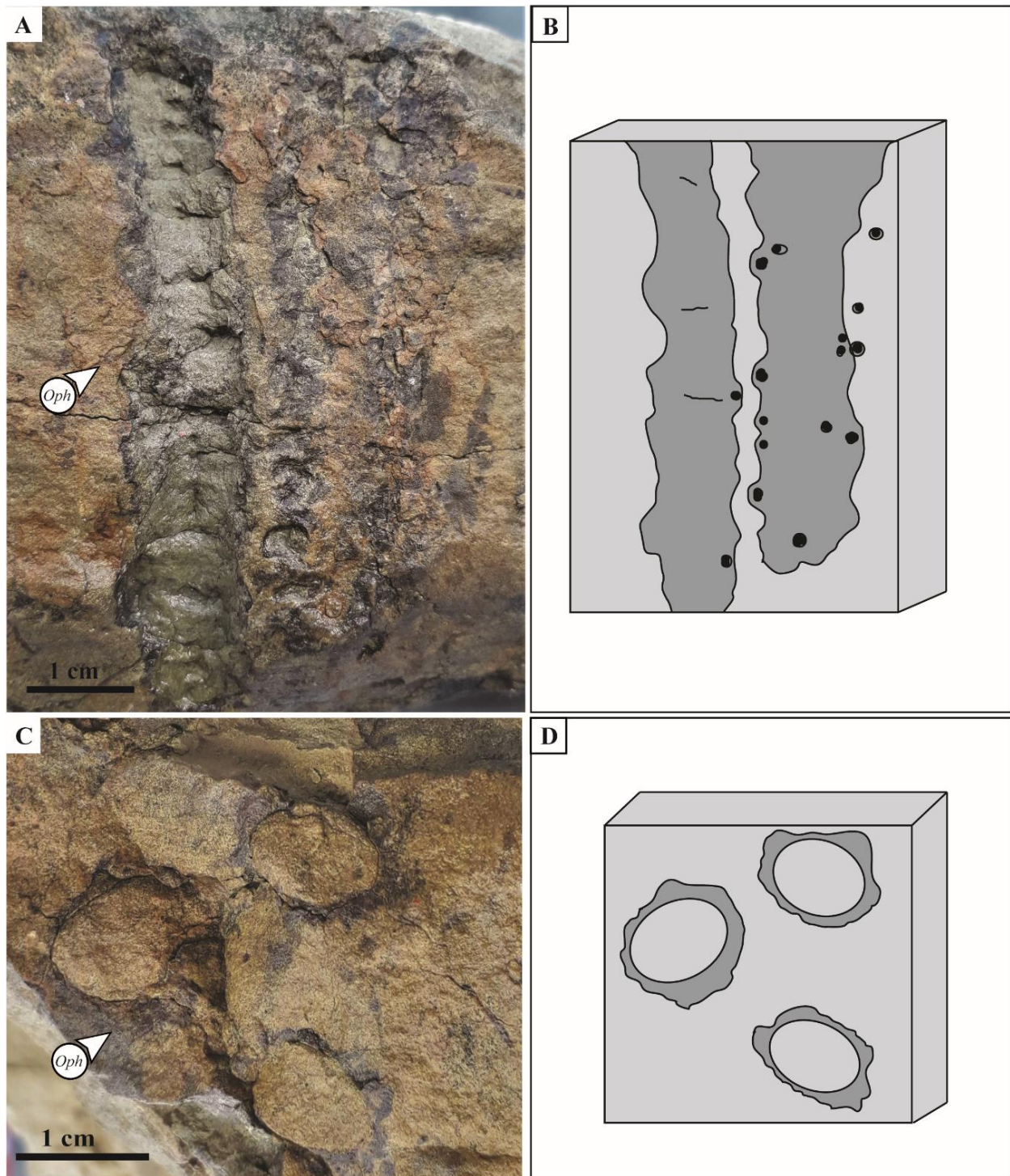


Figura 40. (A) *Ophiomorpha cf. nodosa*, preservado dentro del estrato. (B) Esquema de *O. cf. nodosa* y su modo de preservación. (C) Galerías *O. cf. nodosa*, en posición horizontal. (D) *O. cf. nodosa* y su posición dentro del sustrato.

Ophiomorpha isp. (morfotipo 1)
(Figura 41 A y B)

Material analizado. Dos ejemplares en campo y tres ejemplares colectados.

Descripción. Los ejemplares de *Ophiomorpha* en esta localidad, se caracterizan por presentar galerías en forma en Y (Figura 41 A), se encuentran en posición horizontal y dentro del sustrato. Las dimensiones son de 10 a 15 cm de longitud, y el diámetro es de 1 cm. Las paredes externas tienen moldes de pellets, pobremente preservados (Figura 41 A). Se conservan en relieve completo y se presentan como galerías solitarias, más que como un sistema integrado. El relleno de las galerías es de arenisca de grano fino, mismo que la roca hospedante.

Distribución: Rancho El 7

Discusión: Las trazas analizadas, se asignan como *Ophiomorpha* isp, debido a que la morfología de los pellets no se observa con detalle y no se encuentran bien preservadas (Figura 41), solo se observan algunos remanentes de éstos.

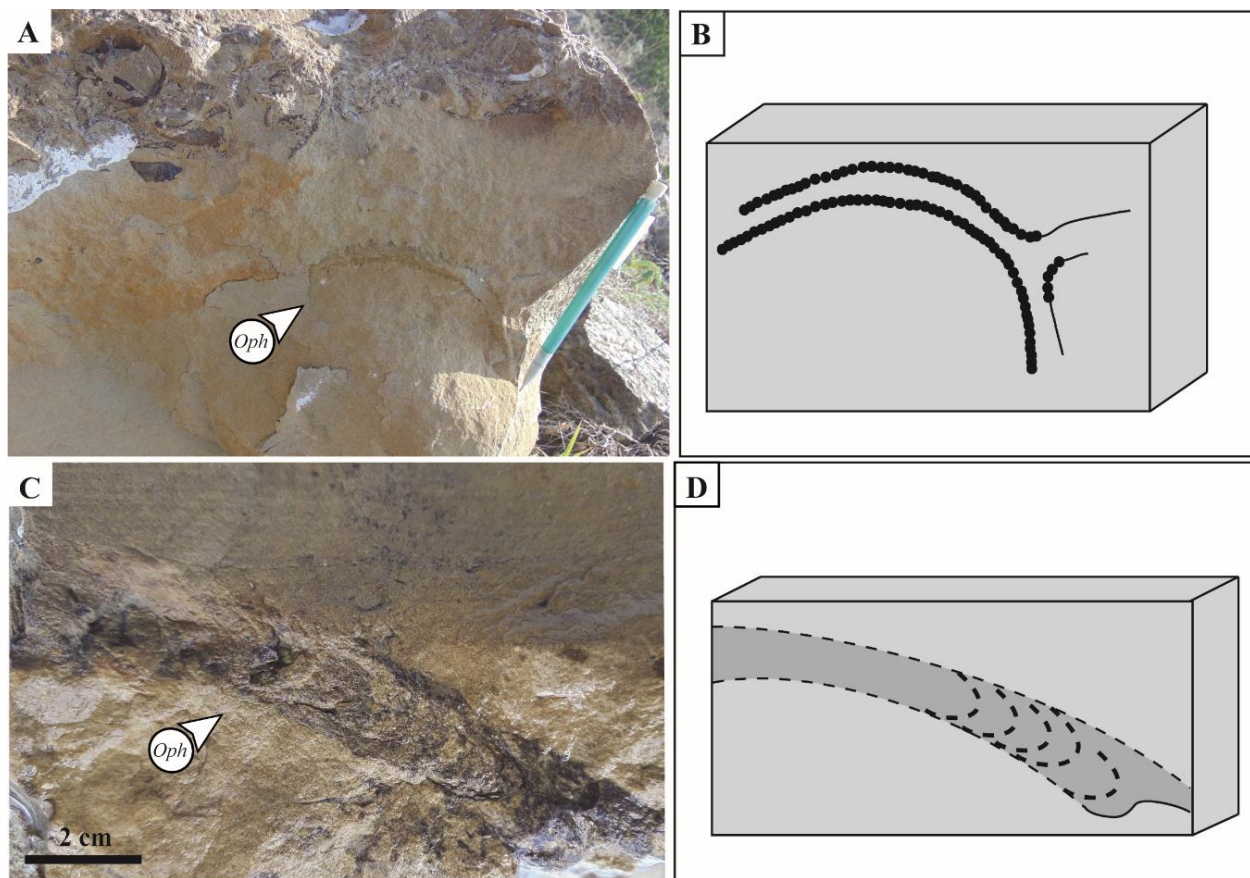


Figura 41. Trazas asignadas a *Ophiomorpha* isp. (morfotipo 1). (A) Trazas dentro del sustrato y con bifurcación. (B y D) Posición de *Ophiomorpha* dentro del sustrato. (C) *Ophiomorpha* con relleno de sedimento fino que le da apariencia de un *spreite*.

Ophiomorpha isp. (morfotipo 2)

(Figura 41 Cy D).

Material analizado. Un ejemplar colectado.

Descripción. Trazas con 9.5 cm de longitud y 1 cm de diámetro, los pellets no están conservados. Se encuentra rellena de arenisca fina y con color óxido. Esta preservada en relieve completo y en posición vertical (Figura 41 C), dentro de una matriz laminar de arenisca. Se encuentra en asociación con *Chondrites* cf. *intricatus* y *Ophiomorpha* cf. *nodosa*.

Distribución. Chirinos.

Discusión. La traza descrita tiene un relleno con apariencia de un *spreite* retrusivo o una estructura meniscada (Figura 41 C y D), razón por la cual se asigna solo a nivel de icnogénero. Frey *et al.*, (1978), mencionó que el sistema de galerías de *Ophiomorpha* en ciertas ocasiones contiene túneles superpuestos parecidos al icnogénero *Teichichnus*, sin embargo, estas estructuras son formadas por láminas de sedimento que rellenan galerías que aún no están abandonadas. Bromley (1996), puntualizó que estas estructuras se forman por procesos tafonómicos. A pesar de que este relleno laminado o meniscado es una característica presente en estructuras de *Ophiomorpha*, no se considera como una icnotaxobase (Rindsberg, 2018), si no un elemento sedimentológico.

Ophiomorpha isp. (morfotipo 3)

(Figura 42)

Diagnosis. Misma diagnosis que en la localidad El Rebaje.

Material analizado. Tres ejemplares colectados.

Descripción. Galerías verticales y semi-inclinadas (Figura 42), la pared tiene un revestimiento de pellets muy mal conservados, la longitud de las galerías es de 5.5 cm, y el diámetro es de 0.5 a 1 cm. El relleno es diferente al de la roca hospedante que consiste en arenisca fina y laminar. Se conserva en relieve completo y se encuentra asociada con *Chondrites targonii* y *Planolites* isp., en el nivel 1, y en el nivel 6 con *Diplocraterion* isp.

Distribución. San José de las Lajas, Nivel 1 y 6 FW (Thateniano-Ypresiano).

Discusión. Las galerías de esta localidad se asignan a nivel de icnogénero, debido a que la icnotaxobase característica de la pared con pellets no se observa con detalle. En el nivel 1 solo se observan algunos remanentes de ellos, mientras que en el nivel 6 los pellets que se conservan como moldes (Figura 42).

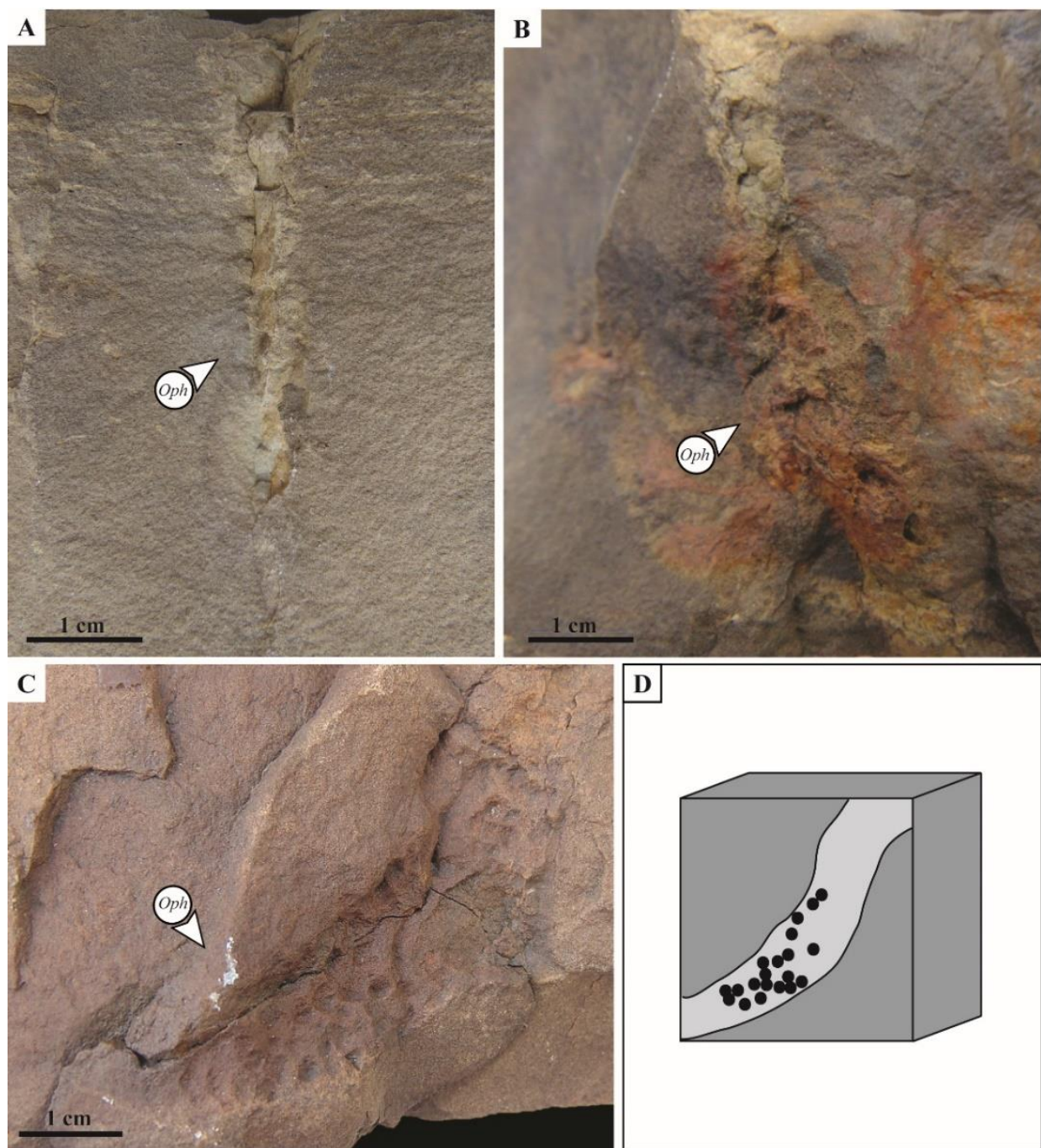


Figura 42. (A- B) *Ophiomorpha* isp, (*Oph*) con los pellets mal conservados y dentro de una matriz de arenisca laminar, nivel 1. (C) *Ophiomorpha* isp. (*Oph*) donde solo se conservan moldes de la pared pelletoidal, nivel 6. (D) Modo de preservación de *Ophiomorpha* isp. (*Oph*) dentro del sustrato.

Ophiomorpha isp. (morfotipo 4)

(Figura 43)

Descripción. Galerías verticales y en menor proporción en posición horizontal, con la pared de pellets los cuales se encuentran deformados. Estas galerías alcanzan hasta 32 cm de longitud y el ancho es de 1.5. En algunos casos se presentan bifurcaciones en la parte superficial de la traza (Figura 43 A y B). Se conservan en relieve completo y en epirelieve. Se encuentran asociados con *Skolithos* isp.

Distribución. La Curva, nivel 2 y 3, FW (Thateniano-Ypresiano).

Discusión. Estas galerías se asignan a nivel de icnogénero, debido a que la morfología de los pellets es muy irregular, algunos se encuentran bien redondeados, mientras que otros están deformados. Como ya se ha mencionado en la localidad de la Presa, estas estructuras son realizadas por crustáceos en donde refuerzan la pared con pellets para evitar el colapso de las galerías, cuando la consistencia del sustrato es muy suave. Las galerías aquí descritas se encuentran conservadas en arenisca de grano medio y con estructuras sedimentarias relacionadas con un ambiente de alta energía (p.ej. estratificación cruzada), lo cual sugiere que los organismos productores de estas galerías las abandonaban de manera súbita.

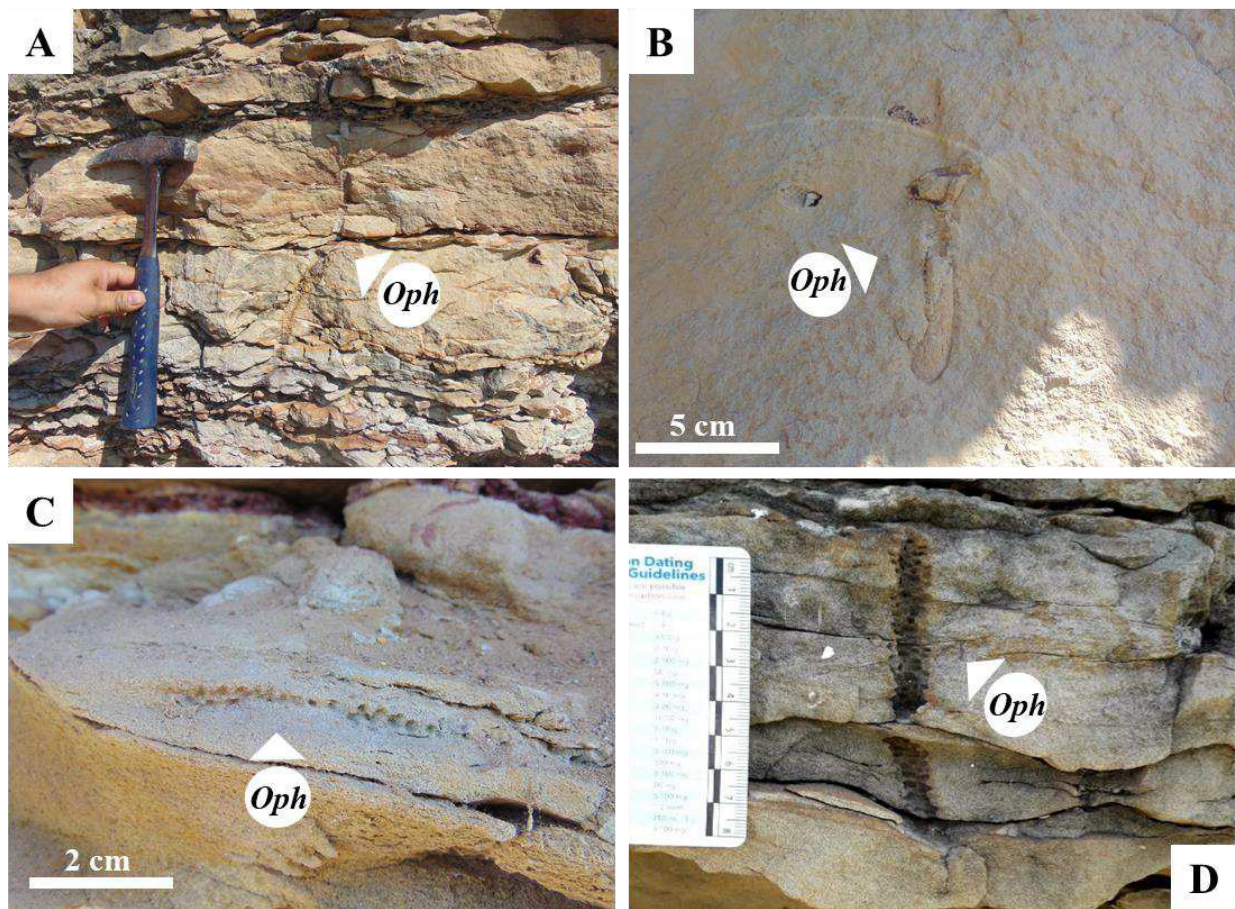


Figura 43. Galerías de *Ophiomorpha* isp. (A) *Ophiomorpha* isp. (*Oph*), con bifurcación en la superficie de la traza. (B-D) Galería de *Ophiomorpha* isp. dentro del sustrato. (C) *Ophiomorpha* isp. (*Oph*), en posición horizontal.

Ichnogénero *Paleophycus* Hall, 1847

Ichnoespecie tipo. *Paleophycus tubularis* Hall, 1847.

Diagnosis. Trazas con ramificaciones poco frecuentes, con revestimiento distintivo, esencialmente cilíndricos, predominantemente horizontales a trazas inclinadas en las que el relleno es típicamente el mismo que la roca hospedante (enmendada por Frey y Howard, 1985).

Paleophycus isp.

(Figura 45E)

Descripción. Trazas horizontales cilíndricas y ligeramente curvas en las puntas (Figura 45 E), la pared está ligeramente preservada (Figura 45 E, flecha blanca). El ancho de las trazas es de 0.6 cm, mientras que el largo es de 3.5 cm, se conservan en hiporrelieves y por debajo del estrato, el relleno de las trazas es el mismo que la roca hospedante (arenisca fina a media).

Distribución. San José de las Lajas, Nivel 3 FW (Selandiano-Ypresiano).

Discusión. Las galerías descritas se asignan como ichnogénero, ya que la pobre preservación que presentan no permite asignarlas a nivel de ichnoespecie, además la principal icnotaxobase que es el revestimiento de la pared tampoco se observa (*sensu* Keighley y Pickerill, 1995). Algo que permite su relación con este ichnogénero es la forma cilíndrica y el relleno, que es el mismo que la roca hospedante. Desde que fue propuesto el ichnogénero *Palaeophycus*, se propusieron alrededor de 154 ichnoespecies, actualmente solo se reconocen 5 (Pemberton y Frey, 1982): *P. tubularis*, *P. striatus*, *P. heberti*, *P. sulcatus* y *P. alternatus*, las cuales se distinguen por la naturaleza de un lining (límite externo de la pared o recubrimiento), el tipo de ornamentación y la presencia o ausencia de ramificaciones (Kim *et al.*, 2001). De acuerdo su etología, este ichnogénero se clasifica como una estructura de vivienda (Domichnia) o de alimentación (Fodinichnia) producida por organismos vermiformes, suspensívoros, como anélidos (Fillion, 1989). El tipo de preservación es en epirrelieve o endichnia, sugiriendo que la actividad del productor tuvo lugar a lo largo de la interfaz del sedimento (Pemberton y Frey, 1982). Se ha registrado *Palaeophycus* en

un amplio rango de ambientes, tanto marinos como continentales, y llega a ser un componente común en depósitos lacustres, fluviales; ambientes marinos marginales y en depósitos deltaicos (planicie deltaica y delta frontal), (Knaust, 2017). Dentro de la clasificación de icnofacies, se ha reportado en la icnofacies de *Cruziana*, pero al ser un icnogénero muy común, se ha encontrado en otras icnofacies (aunque de manera subordinada) como *Skolithos*, *Zoophycus* y *Nereites* (MacEachern *et al.*, 2012; Knaust, 2017).

Icnogénero *Planolites* Nicholson, 1893

Icnoespecie tipo. *Planolites beverleyensis* Billings, 1862.

Diagnosis. Tubos cilíndricos de diámetro constante a lo largo de un mismo ejemplar, de paredes lisas, con diferente grado de curvatura o rectos, no ramificados y dispuestos en cualquier posición en el espacio (Pemberton y Frey, 1982).

Planolites isp.

(Figura 44)

Descripción. Galerías de tubos cilíndricos horizontales, ligeramente curvados, sin ramificaciones, se encuentran en algunos casos encimadas unas sobre otras. La pared es lisa y el sedimento que rellena las galerías es más fino que la roca hospedante. Se conservan en epirrelieves negativos (Figura 44). Los tubos tienen una longitud de 3 a 5 cm y un ancho de 0.3 a 1 cm. Se encuentran asociadas con *Ophiomorpha* isp., y *Chondrites targonii* en el nivel 1 y con *Sinisichnus sinuosus* en el nivel 5.

Distribución. San José de las Lajas, Nivel 1 y 5 FW (Thanetiano-Ypresiano).

Discusión. Las galerías descritas se asignan solo a nivel de icnogénero, debido a que en las mismas muestras se pueden encontrar tanto estructuras ligeramente curvadas como rectas, se comparan con *Planolites mountains* (Richter, 1937), sin embargo éstas presentan un tamaño pequeño y son galerías curvadas, y sin estructuras de revestimiento (Figura 45). Las

descripciones de este icnogénero refieren que se debe a la actividad de un organismo detritívoro que excava irregularmente en un sustrato, por lo común arenoso o fangoso, en busca de nutrientes (García-Ramos, 1984). Varios autores han evaluado la taxonomía de *Planolites* (Pemberton y Frey, 1982; Fillion y Pickerill, 1990; Keighley y Pickerill, 1995). Algunos mencionan que morfológicamente es similar al icnogénero *Palaeophycus*, llegando a la conclusión que *Planolites* representa una estructura de alimentación sin forro que se rellenó activamente y que el relleno es diferente al sustrato que contiene a la traza, mientras *Palaeophycus* representa una excavación que fue forrada de una pared con un rayado paralelo (Häntzschel 1975). Las trazas fósiles del icnogénero *Planolites* tienen pocas características morfológicas distintivas y se ha aplicado a una gran variedad de estructuras comparables. Este icnogénero, según su etología, se puede asignar a Fodinichnia, (estrategias de alimentación), o a Domichnia, (trazas de domicilio), o pueden indicar un tipo de comportamiento superpuesto (Seilacher, 2007). Ambientalmente se ha registrado tanto en ambientes marinos como continentales (Knaust, 2017). Se ha asociado generalmente a la Icnofacies Cruziana pero también puede estar presente en la Icnofacies Nereites (Buatois y Mángano, 2011)

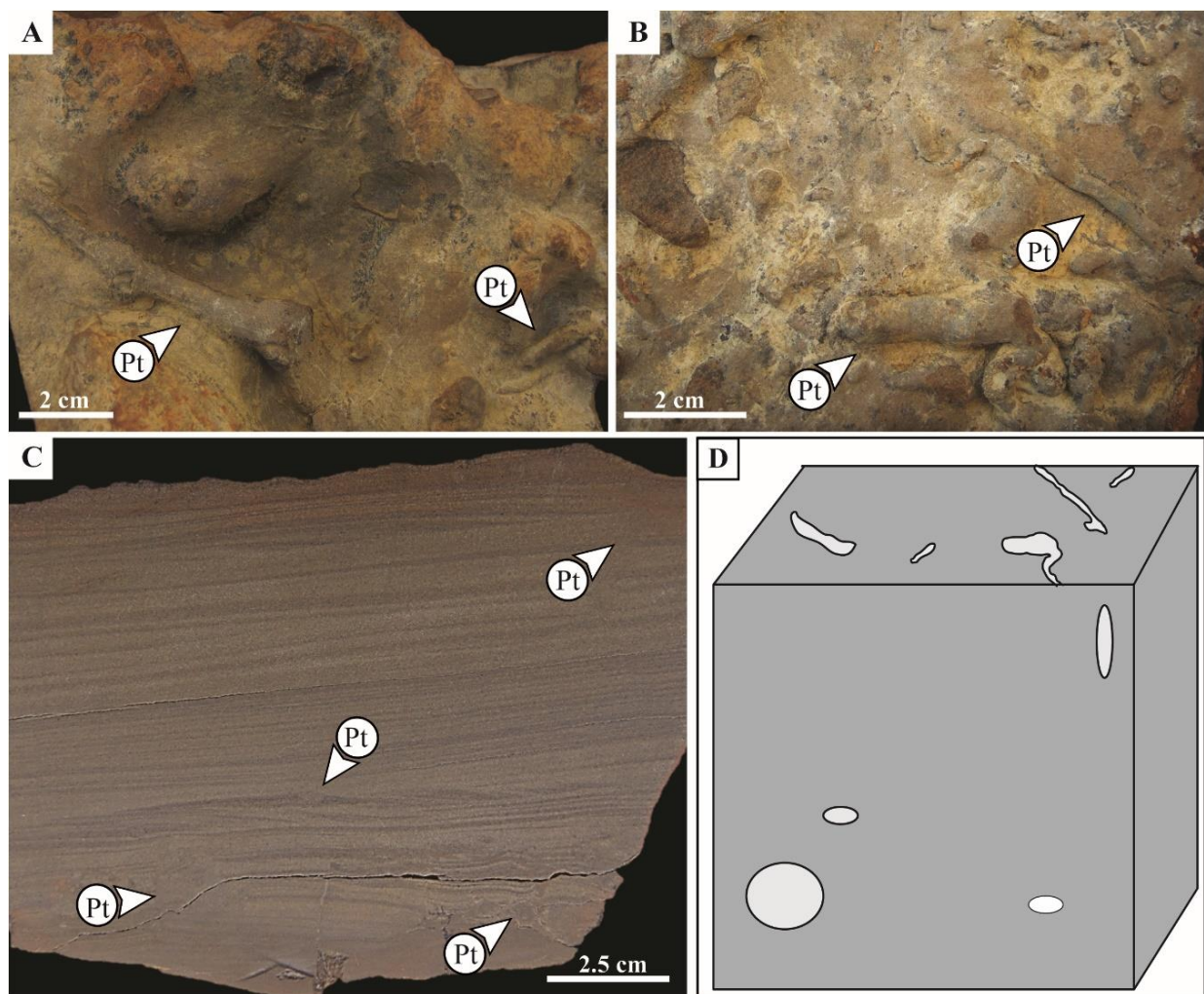


Figura 44. Trazas asignadas a *Planolites* isp. (A-B) *Planolites* isp. (Pt) conservado en arenisca fina. (C) Estructuras biodeformacionales (moteados) de *Planolites* isp. (Pt) dentro del estrato, se observa como las galerías interrumpen la laminación. (D) Representación esquemática de *Planolites* isp. y su posición dentro del sustrato.

Ícnogénero *Psilonichnus*, Fürsich, 1981

Ícnoespecie tipo. *Psilonichnus tubiformis*, Fürsich, 1981

Diagnosis. Madrigueras predominantemente verticales, cilíndricas, sin pared, que van desde ejes irregulares a ejes con forma de J o Y, o estructuras en forma de “U”; ramificaciones laterales, no necesariamente del mismo diámetro que los troncos parentales, pueden estar presentes y tienden a formar cuerpos de saco singulares o bifurcados (enmendada por Frey *et al.*, 1984).

Psilonichnus isp.
(Figuras 45 A, C y D)

Descripción. Galerías pequeñas y ramificadas en forma de “Y” o “J” (Figuras 45 C y D), con 9 a 10 cm de longitud y 0.5 cm de diámetro, el diámetro se ensancha a 1 cm en las ramificaciones, no tiene pared. El relleno es de arenisca muy fina, diferente al de la roca hospedante que es arenisca de grano medio. Se preservan como relieve completo dentro del sustrato. Se encuentran en asociación con *Paleoephycus* isp., y *Skolithos* isp.

Distribución. San José de las Lajas, nivel 3, Formación Wilcox (Selandiano-Ypresiano).

Discusión. Las madrigueras se asignan a *Psilonichnus*, debido a que presentan en la parte donde comienzan las ramificaciones se ensancha la madriguera, la forma de “J” es también común. Generalmente este icnogénero tiene un diámetro de 2.5 a 4.5 cm y puede llegar hasta 2 m de longitud. El diámetro puede ser menor dependiendo de la etapa ontogenética del organismo productor (Frey *et al.* 1984). Un icnogénero comparable con las trazas descritas es *Polykladichnus*, la cuales también la morfología típica es en forma de Y, sin embargo no poseen un ensanchamiento en la bifurcación y generalmente tienen conexión con la superficie (Schlirf y Uchman 2005), además los organismos productores son poliquetos. *Psilonichnus* ha sido atribuido a la actividad de crustáceos decápodos, principalmente de camarones talasinoides y cangrejos ocipódidos (Frey *et al.* 1984; Nesbitt y Campbell 2006).

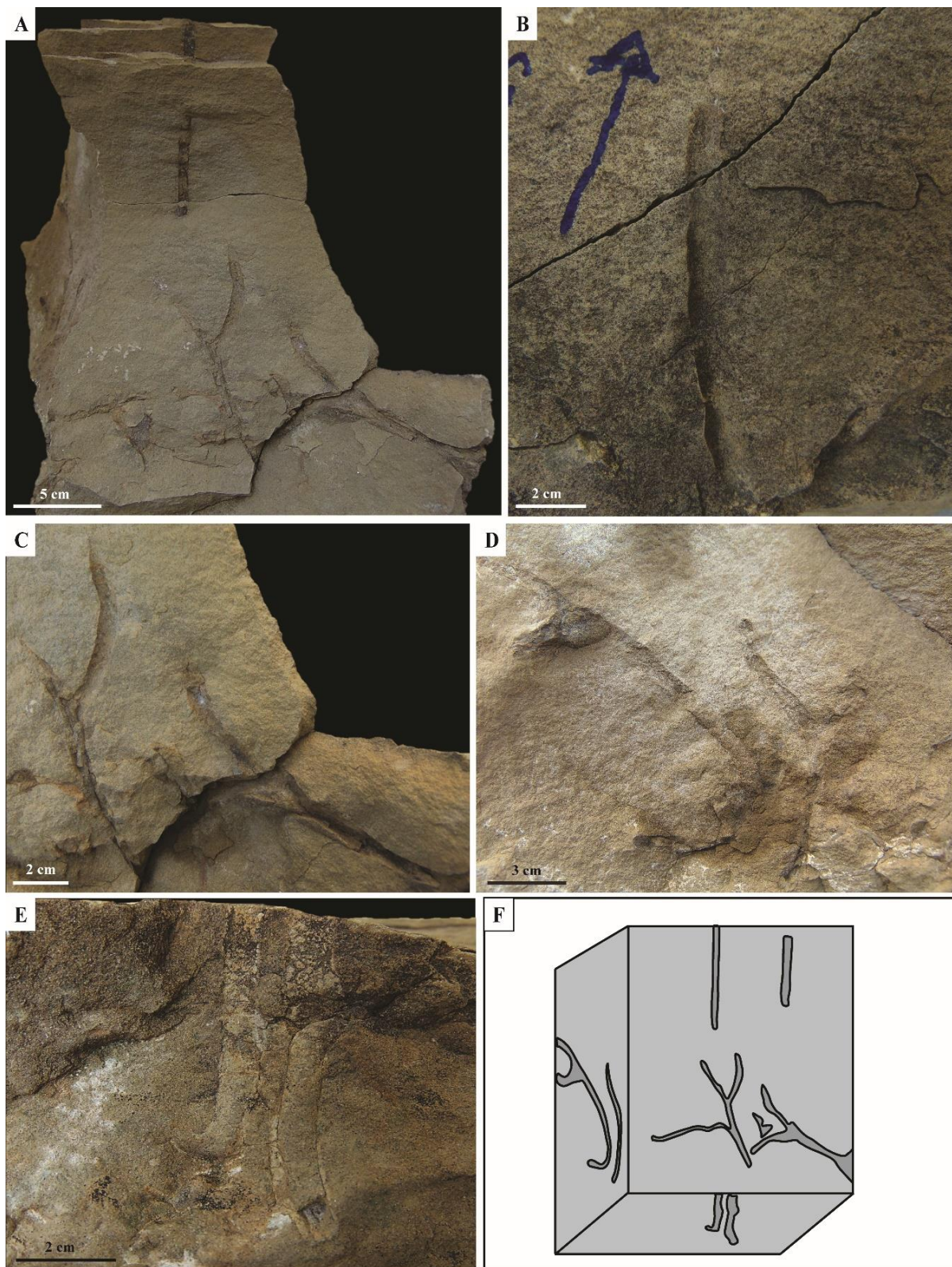


Figura 45. (A, C y D) Ejemplares de *Pylonichnus* isp., en donde se nota con claridad el ensanchamiento en la ramificación. (B) *Skolithos linearis*. (E) *Palaeophycus* isp. (F) Diagrama

esquemático de la posición de las trazas fósiles (*Paleophycus* isp., *Psilonichnus* isp. y *Skolithos linearis*).

Ichnogénero *Protovirgularia* McCoy 1850

Ichnoespecie tipo. *Protovirgularia dichotoma* M'Coy, 1850.

Diagnosis. *Protovirgularia* es caracterizado por pequeñas trazas en forma de quilla, compuesto por una línea media y apéndices laterales en forma de cuña alternándose en ambos lados.

Protovirgularia dichotoma

(Figura 46)

Material analizado. Un ejemplar colectado y un ejemplar en campo.

Descripción. Traza horizontal formada por una repetición de seis surcos poco profundos alineados sobre un eje central (Figura 46 A), la longitud de los surcos es de 0.5 cm, y la distancia entre cada surco es de 0.1 cm, se conserva en epirrelieve negativo y en arenisca.

Distribución. La Presa nivel 3, F.R. (Ypresiano-Lutetiano).

Discusión. La traza descrita muestra similitudes con el morfotipo 1, designado por Gibert y Doménech (2008), en donde señala que los surcos son poco profundos en forma de V y con una ligera convexidad opuesta al vértice en el que se unen, conservados en epirrelieves negativos, los cuales se alinean sobre un eje principal, este morfotipo fue asignado a la ichnoespecie *P. dichotoma*. La diferencia principal entre la traza aquí determinada y descrita por Gibert y Doménech (2008) es la ligera convexidad de los surcos, característica que no se presenta en el material descrito, en estos la convexidad se nota mucho menos (Figura 45). El ichnogénero *Protovirgularia* se caracteriza porque su formación y preservación está ligada a factores externos a los del comportamiento del organismo productor, como la consistencia del sustrato, la posición de la traza dentro del mismo y la profundidad de penetración del productor (Carmona *et al.*, 2010), los cuales dan origen a ligeras diferencias morfológicas y por lo tanto no tiene

consecuencias taxonómicas (Gibert y Doménech, 2008). Se ha interpretado que *Protovirgularia* es resultado de la actividad del pie bífido de bivalvos protobranquios con hábitos excavadores y rastreros en sustratos suaves (Seilacher y Seilacher, 1994; Ekdale y Bromley, 2001), y también se ha interpretado que es una traza realizada por bivalvos nuculoídeos (Gibert y Doménech, 2008). De acuerdo con su etología se clasifica como Repichnia, en la que las trazas se generan por el desplazamiento sobre un sustrato relativamente suave (Ekdale y Bromley, 2001) y dan lugar a grupos de formas alineadas y en chevron o espiga. Este icnogénero se ha relacionado a ambientes de planicie de marea, deltaicos y a la Icnofacies Cruziana (Paranjape *et al.*, 2013).

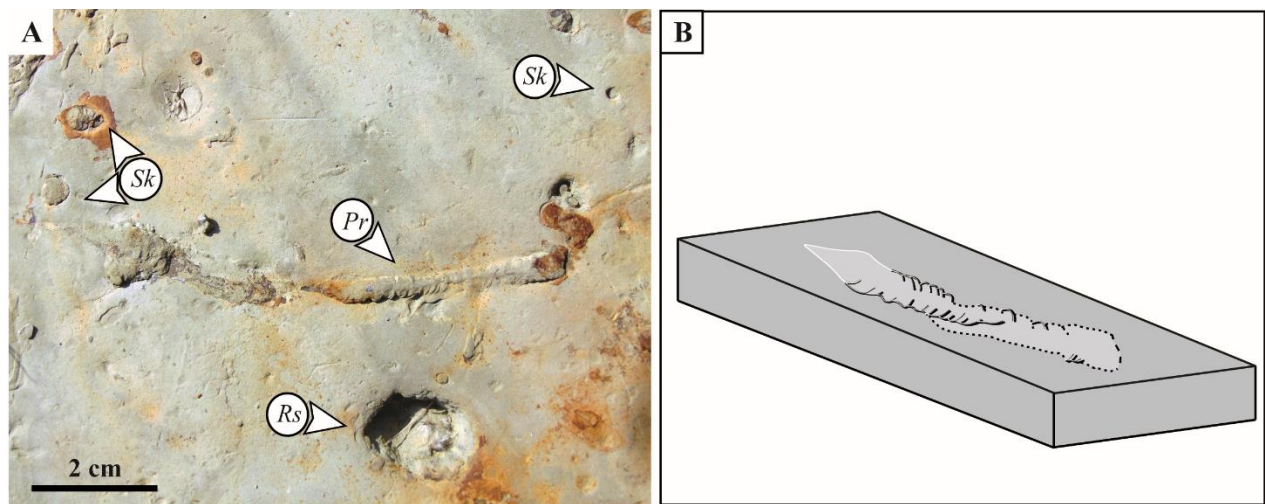


Figura 46. (A) *Protovirgularia dichotoma* (Pr), asociado con *Skolithos* isp (Sk) y *Rosselia* isp. (Rs) (B) Esquema de *Protovirgularia dichotoma*, y su posición dentro del sustrato

Icnogénero *Sinusichnus* Gibert, 1996

Icnoespecie tipo. *Sinusichnus sinuosus* Gibert, 1996

Diagnosis. Sistemas de madrigueras desarrollados horizontalmente con elementos sinuosos y con múltiples ramificaciones (Gibert, 1996).

Sinusichnus sinuosus Gibert, 1996

(Figura 47 y 48)

Material analizado. Cuatro ejemplares colectados y dos ejemplares en campo.

Descripción. Se trata de robustas galerías bidimensionales en posición horizontal, en su mayoría en forma de “Y” y en menor proporción en “H”. Las galerías más anchas tienen una longitud de onda 8 cm, amplitud 2 cm y diámetro de 2 cm. Mientras que las galerías más angostas tienen una longitud de onda 5 cm, amplitud de 0.7 cm y diámetro de 0.5 cm. En relleno en ambos tipos de galerías es de arenisca fina, mismo que la roca hospedante y se conservan en epirrelieve positivo. Se presentan puntos de ramificación en las galerías grandes con un ángulo de 110°, mientras que las angostas tienen (Figura 47, flecha amarilla). La pared es suave y no se presentan ejes verticales, no hay presencia de un *spreiten*.

Distribución. San José de las Lajas, nivel 2, 4, 5 y 6, FW (Thanetiano-Ypresiano).

Discusión. Las galerías descritas se han atribuido a la icnoespecie de *Sinusichnus sinuosus*, porque presentan elementos típicos como la sinuosidad de las galerías, el patrón de ramificación, y la posición dentro del estrato. Para definir la geometría, regularidad y sinuosidad de *Sinusichnus* se han tomado en cuenta tres parámetros: longitud de onda (λ), amplitud (A), diámetro (d) (Gibert, 1996; Gibert *et al.*, 1999; Belaústegui, 2013), (Figura 47 B). Este icnogénero es agrupado en la misma categoría de los Ophiomorphidos (*sensu* Seilacher, 2007): *Ophiomorpha*, *Thalassinoides* y *Spongeliomorpha*, en donde el organismo productor se ha asociado a la actividad de crustáceos decápodos y la morfología corresponde a grandes redes de túneles con característicos puntos de ramificación en forma de Y, y que a menudo se desarrollan horizontalmente (Bromley y Frey, 1974; Belaústegui, 2013). Este icnogénero, en cuanto a su etología, muestra características típicas de Fodinichnia (estrategias de alimentación típicas de crustáceos depositívoros, por su patrón de ramificación y atribuidas a ejemplares adultos) y características de galerías graptolíticas (estrategias de alimentación típicas de redes de trampas o captura para alimentarse de meiofauna, patrón geométrico regular y atribuidas a ejemplares juveniles), esto se considera un comportamiento combinado de estrategias alimentación tanto de Fodinichnia y Agrichnia (Gibert *et al.* 1999; Buatois *et al.* 2009), en donde las etapas

ontogénicas juegan un rol importante en estas estrategias. En los ejemplares aquí descritos estas estrategias también parecen corresponder a lo antes mencionado, las galerías robustas a estrategias de Fodinichnia (Figura 47 A y C), mientras que los ejemplares de menor tamaño a estrategias de Agrichnia (Figura 47 D). Ambientalmente *S. sinuosus*, es referido a diversos ambientes, desde abanicos submarinos, pasando por marinos marginales y deltas (Gibert, 1996; Gibert *et al.*, 1999; Belaústegui, 2013; Luo *et al.*, 2018). En el contexto de icnofacies, *S. sinuosus*, es considerado como un elemento de la Icnofacies Cruziana (Buatois *et al.*, 2009).

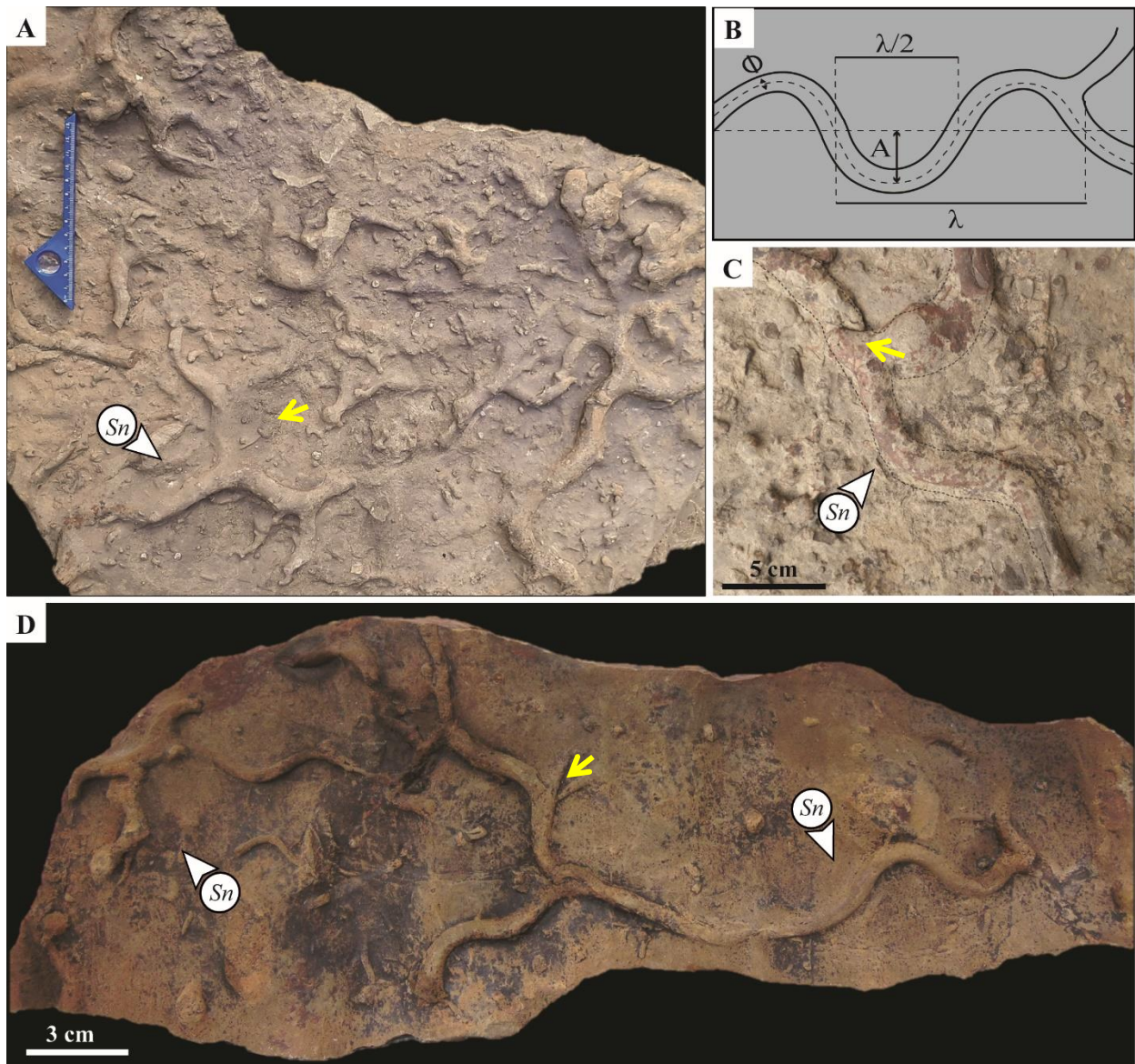


Figura 47. *Sinusichnus sinuosus* en la localidad San José de las Lajas. (A) Densa población de *S. sinuosus* (Sn), el tamaño de las galerías es grande y se preserva en la superficie del estrato, se

observan los puntos de ramificación (flecha amarilla, la escala de la barra azul es de 13 cm). **(B)** Parámetros geométricos de *Sinusichnus*. **(C)** *S. sinuosus* (*Sn*) con ramificaciones irregulares. **(D)** *S. sinuosus* (*Sn*), de tamaño pequeño y conservado sobre ripples.

Ejemplares de *S. sinuosus* también se encontraron en la localidad de La Presa, de la Formación Reklaw, a continuación, se describen estos:

Material analizado. Dos ejemplares colectados y múltiples ejemplares en campo.

Descripción. Galerías horizontales con túneles sinuosos, bidimensionales y con ramificaciones en forma de Y y H (Figura 48 A). Se presentan dos tipos de madrigueras: anchas y angostas. La sinuosidad de los túneles en las trazas anchas tiene una amplitud de 4 cm, y una longitud de onda de 8.5 cm, el diámetro es de 1.1 cm. La sinuosidad de los túneles en las trazas angostas tiene una amplitud de 2.1, una longitud de onda de 4.5, y diámetro de 1.6 cm. El relleno en ambos tipos de madrigueras es de arenisca fina, mismo que la roca hospedante y se conservan en epirrelieve positivo. Se presentan puntos de ramificación en las madrigueras angostas con un ángulo de 110° (Figura 48 C, flecha amarilla). La pared es suave y no se presentan ejes verticales, no hay presencia de un *spreiten*.

Discusión. Los ejemplares que se describen en esta localidad se asignaron a *Sinusichnus sinuosus*, debido a que presenta las características diagnósticas de esta icnoespecie: la sinuosidad típica y presencia de ramificaciones, éstas últimas convergen en un punto y forman una configuración similar a una hélice de tres brazos (Figura 48 C). En los ejemplares reportados por Gibert (1996) y Belaústegui (2013) mencionaron que la presencia de *spreite* puede estar o no presente, en los ejemplares aquí descritos no está presente, por lo tanto, la presencia o no de esta icnotaxobase no tiene consecuencias icnotaxonómicas. Al igual que en la localidad de San José de las Lajas, aquí se encontraron ejemplares tanto grandes como pequeños y angostos (Figuras 48 C y D).

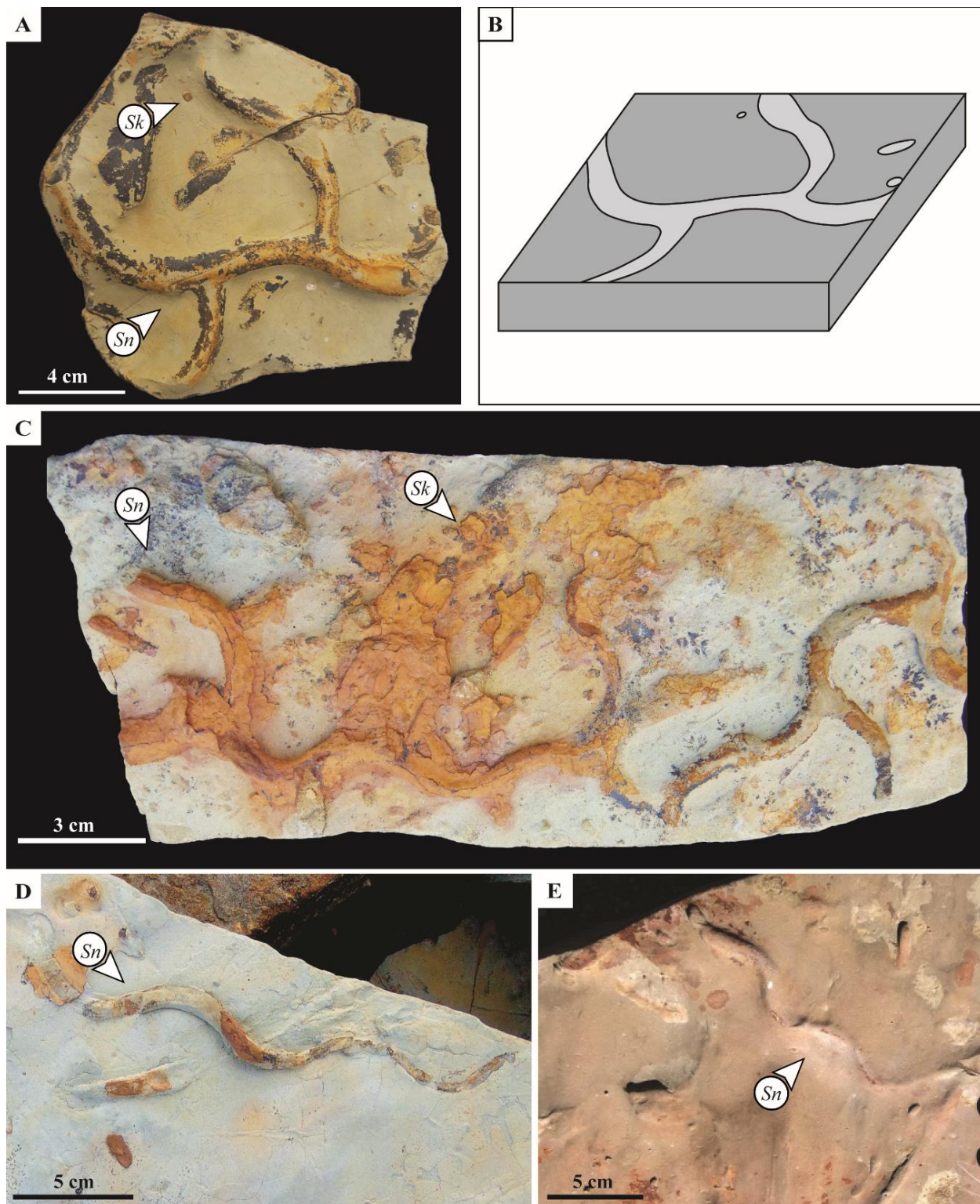


Figura 48. Trazas asignadas a *Sinusichnus sinuosus*. (A). *S. sinuosus* con ramificaciones en forma de H y en posición horizontal. (B) Posición dentro del sustrato de *S. sinuosus*. (C) *S. sinuosus*, más angostas y en forma de espiral. (D y E) *S. sinuosus*, sin ramificaciones. Todas estas trazas se conservan en epirrelieve.

Ichnogénero *Skolithos* Haldeman, 1840

Ichnoespecie tipo. *Skolithos linearis* Haldeman, 1840

Diagnosis. Traza vertical a ligeramente inclinada, cilíndrica a sub-cilíndrica, recta a ligeramente curvada, no ramificada, con relleno homogéneo y con una relación muy alta entre la longitud y el diámetro (enmendada por Knaust *et al.*, 2018).

Skolithos linearis Haldeman, 1840
(Figuras 45B y 49)

Material analizado. Un ejemplar colectado y múltiples ejemplares en campo.

Descripción. Trazas que se presentan como galerías simples, de diámetro uniforme, vertical y no ramificado. Estas trazas son rectas, pero en algunos casos están curvados (Figura 49 A). El diámetro de las galerías es de 0.3 a 0.5 cm, y la longitud máxima es de 5 cm. La pared es irregular y el relleno es de arenisca más fina que la roca hospedante. Se encuentran conservados en relieve completo y se encuentra muy relacionada con *Rosselia* isp. Otras trazas con las que se asociada en la localidad son *Lockeia* isp., *Ophiomorpha nodosa*, *Protovirgularia dichotoma*, *Sinusichnus sinuosus* y *Thalassinoides* isp.

Distribución. La Presa niveles 2, 3, 4 y 5, F.R. (Ypresiano-Lutetiano).

Discusión. El ichnogénero *Skolithos* ha sido ampliamente descrito, sin embargo su estado icnotaxonómico no se ha establecido con claridad (*sensu* Knaust *et al.*, 2018). Las diversas ichnoespecies que se han determinado, se han diferenciado por poseer o no una pared, creada por la actividad del organismo productor (Bromley, 1996; Knaust, 2015). Los ejemplares aquí descritos se asignan a *Skolithos linearis* debido a que son trazas lineares, y en un solo caso inclinada (Figura 49 A), el relleno de la traza es muy similar a la roca hospedante y la pared está ausente (Figura 49 B). En general se ha considerado que *Skolithos* es una estructura de vivienda (Domichnia), y como probables productores a anélidos, forónidos y sipuncúlidos (Seilacher, 1964; Alpert, 1974). Se ha relacionado a ambientes marinos poco profundos, presentando actividad de organismos suspensívoros (Netto, 2007).

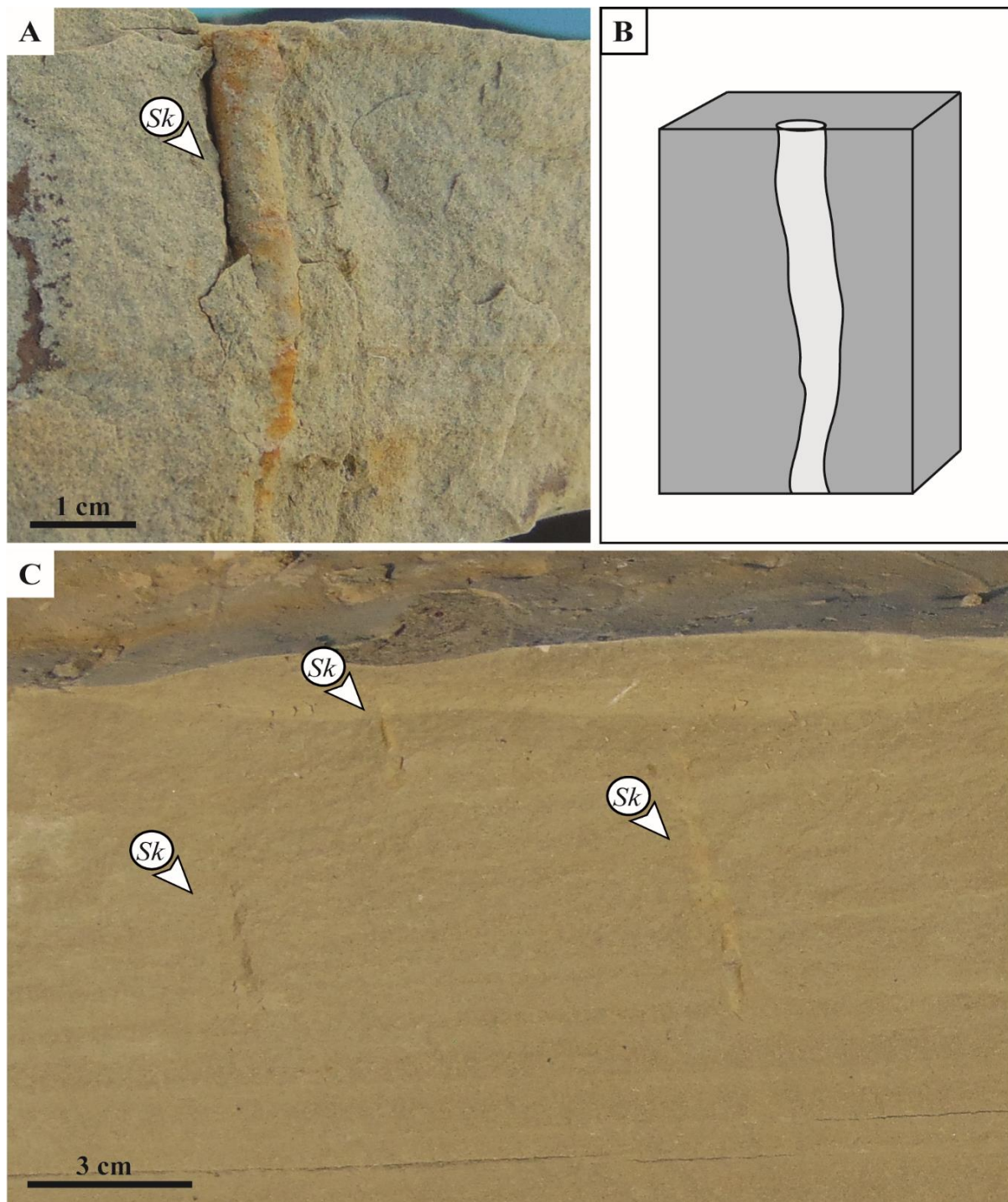


Figura 49. (A) *Skolithos linearis* (Sk), conservada en una matriz de arenisca media a fina. (B) Representación de *Skolithos linearis* dentro del sustrato. (C) *Skolithos linearis* (Sk) conservada en una matriz de arenisca fina y con laminación interna.

Skolithos isp.

(Figura 50)

Material analizado. Cuatro ejemplares en campo.

Descripción. Galerías simples en posición vertical con 1.5 de ancho y 20 cm de longitud. Se conservan como relieve completo, no poseen pared. Estas galerías están en arenisca media y sobre estratificación cruzada planar. Se encuentran asociadas con *Diplocraterion* isp.

Distribución. San José de las Lajas, nivel 2, 3 y 6; La Curva nivel 1, FW (Thanetiano-Ypresiano).

Discusión. Las trazas descritas se asignan solo a nivel de género, debido a que solo se conservan los moldes, no hay estructuras de relleno, ni pared, lo cual dificulta su asignación a nivel icnoespecífico. Algo que cabe mencionar en los ejemplares de ambas localidades es la longitud de las trazas, la cual que alcanzan hasta 20 cm en la localidad de La Curva, así como el que son muy angostas, lo cual se puede asociar a la energía del ambiente, provocando que los organismos tengan que abandonar repentinamente las galerías.

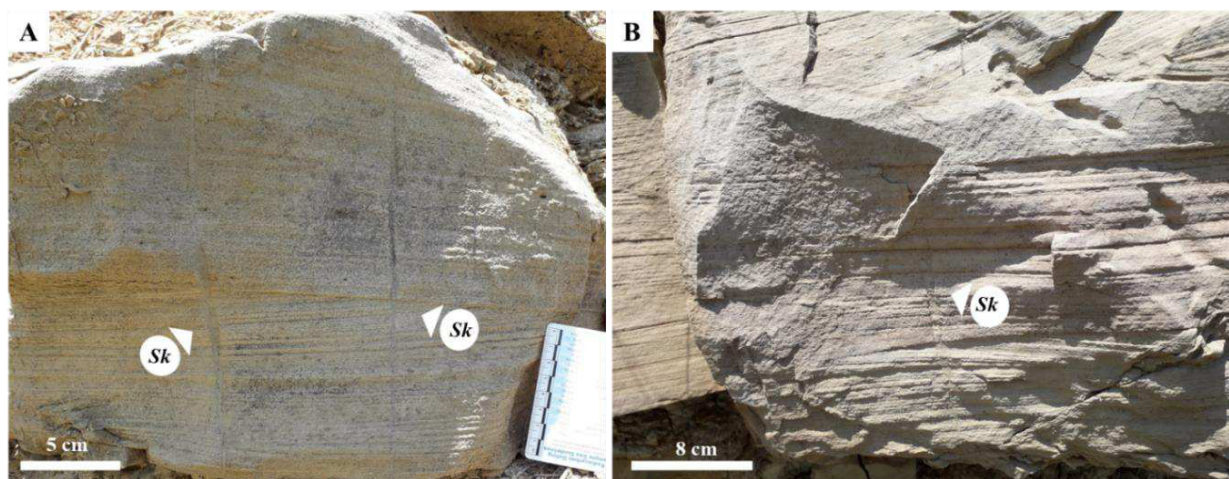


Figura 50. Trazas asignadas a *Skolithos* isp (*Sk*). (A-B) *Skolithos* isp. conservado en relieve completo, se observa que son trazas muy tenues.

Ichnogénero *Thalassinoides* Ehrenberg, 1944

Ichnoespecie tipo *Thalassinoides callianassae* Ehrenberg, 1944.

Diagnosis. Sistemas de galerías amplios con elementos tanto verticales como horizontales, Galerías cilíndricas, entre 2 y 20 cm de diámetro. Ramificación regular, caracterizada por bifurcaciones en forma de Y, y ensanchadas en el punto de bifurcación. Los elementos horizontales se unen para formar polígonos. Dentro de un sistema de galerías, las dimensiones son variables. Los sistemas horizontales se conectan a la superficie mediante ejes verticales o muy inclinados, se han asociado con restos calasinidos (enmendada por Kennedy, 1967).

Thalassinoides isp.

(Figura 51)

Descripción. Galerías horizontales, con ramificaciones en forma de Y, con pared lisa, que forman un sistema de galerías simple. El diámetro de las ramificaciones es de 3 cm y la longitud es de 45 cm (Figura 51), se conservan en epirrelieve y sobre arenisca fina. Están preservadas como epirrelieve, y dentro de arenisca. Se encuentran en asociación con *Arenicolites* isp., *Lockeia* isp., *Ophiomorpha nodosa*, *Protovirgularia dichotoma*, *Rosselia* isp., *Sinusichnus sinuosus* y *Skolithos linearis*.

Distribución. Localidad La Presa, Nivel 2 y nivel 5, FR (Ypresiano-Lutetiano).

Discusión. Estas galerías debido a su pobre preservación, se han asignado solo a nivel de ichnogénero. Se presentan ramificaciones bien definidas, sin ornamentación en la pared, distinguiéndose de *Ophiomorpha* y *Spongeliomorpha*. Se ha sido atribuido a la actividad de diversos productores, sin embargo posee más afinidades con crustáceos decápodos (p. ej. Kennedy, 1967; Myrow, 1995; Bromley, 1996; Carvalho *et al.*, 2007; Yanin y Baraboshkin, 2013) basado en la asociación de fósiles corporales, pellets fecales y con la comparación de análogos actuales (Carmona *et al.*, 2004; Carvalho *et al.*, 2007). *Thalassinoides* es generalmente una estructura de habitación (Domichnia) o de alimentación (Fodinichnia), (Howard y Frey, 1984). Este ichnogénero es un elemento común de las Ichnofacies de *Zoophycus* y *Glossifungites* (Reolid y Betzler, 2019).

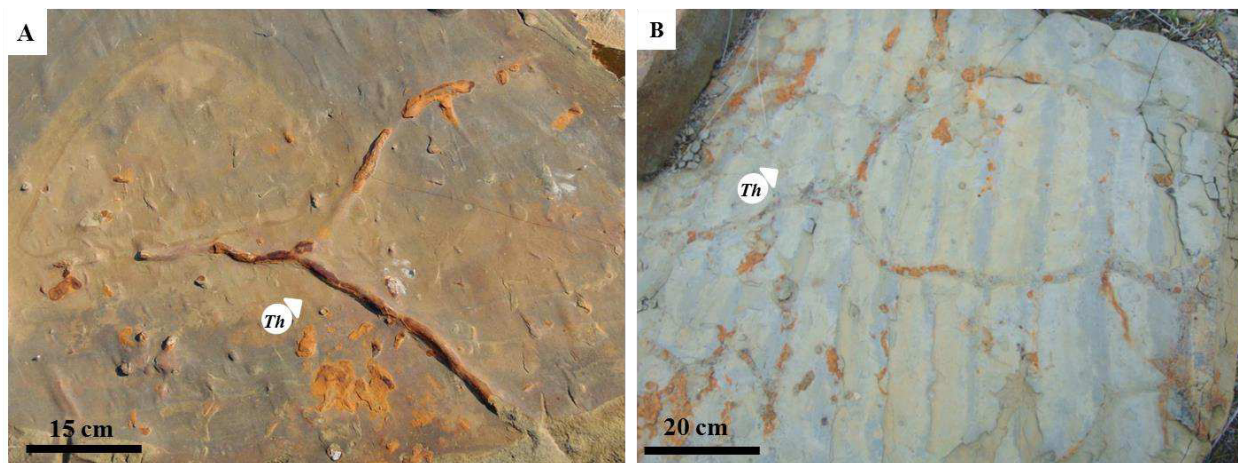


Figura 51. Galerías de *Thalassinoides* isp. (A) *Thalassinoides* isp (Th), con ramificaciones pobremente preservadas. (B) *Thalassinoides* isp. (Th), con mala preservación.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

El presente trabajo contiene el registro icnofosilífero más amplio en la Cuenca de Burgos, otros trabajos han reportado icnofósiles como una característica sedimentológica, sin embargo, los trabajos enfocados específicamente en el estudio de asociaciones icnofosilíferas son tremendamente escasos. El trabajo más detallado es el publicado por Ekdale y Stinnesbeck (1998), sin embargo, este se centró en el límite entre el Cretácico y el Paleógeno en la parte sur de la Cuenca de Burgos.

La determinación de los ambientes de depósito a través de asociaciones icnofosilíferas, debe ser acompañado por un análisis integral que envuelva las características sedimentológicas y petrográficas del afloramiento estudiado (Gingras *et al.* 2006). Por este motivo, en este trabajo se analizaron las características sedimentológicas (litología, estructuras sedimentarias), icnológicas y petrográficas, para darle un sentido integral a las interpretaciones paleoambientales.

Debido a su posición geográfica y sobretodo la posición de las franjas paralelas que caracterizan a la CB, se infiere que la parte más basal de las áreas estudiadas corresponde a El Rebaje. Seguido de San José de las Lajas, La Curva como la parte media, y la localidad La Presa, como la parte superior.

5.1 Distribución de las trazas fósiles

El análisis de las icnoasociaciones, muestra diferencias en el grado de bioturbación, la relación de corte de los icnotaxones, estrategias de alimentación, las categorías arquitecturales de las trazas (*sensu* Buatois *et al.* 2017), y la distribución espacial que ocupan los organismos en el estrato (*tiering*). Estas características reflejan, en cierta forma, la icnodiversidad y la ubicación espacial según la zonación vertical de acuerdo a parámetros físicos, biológicos y químicos (Buatois y Mángano 2008) (Tabla 5).

En El Rebaje, se reconocieron a *Ophiomorpha* y *Chondrites*, las cuales se encuentran dentro de arenisca fina con estratificación cruzada de bajo ángulo, no se observó destrucción importante de la fábrica sedimentaria. Las trazas de mayor tamaño están representadas por *Ophiomorpha*, las cuales ocupan más área respecto a las trazas de *Chondrites*, de manera que

éstas son más pequeñas y ocupan una menor área dentro de los estratos. En general el IB=1, la posición más somera la ocupa *Ophiomorpha*.

En San José de las Lajas. las icnoasociaciones se reconocieron por las relaciones de estratos que están más cercanos entre sí, éstas se corresponden también a los niveles reconocidos en la columna estratigráfica. Se localizaron seis niveles con diferentes icnofauna y grado de bioturbación.

Nivel 1, se presenta *Chondrites targonii*, *Ophiomorpha* isp. y *Planolites* isp., y tenuemente se localizan trazas de escape, el IB=2. Las trazas de mayor tamaño están representadas por *Ophiomorpha* y *Planolites*, las cuales ocupan un nivel más somero. *Chondrites targonii*, está distribuido en la parte más profunda, la fábrica sedimentaria se ve apenas interrumpida por *Ophiomorpha*.

Nivel 2, hay presencia de *Skolithos* isp. y *Sinusichnus sinuosus*, a pesar de que no es un nivel icnodiverso. Hay una densa población de *S. sinuosus*; ocupando la zona más somera del estrato, mientras que la traza profunda es *Skolithos* isp. La fábrica sedimentaria está interrumpida esporádicamente por *Skolithos*; el índice de bioturbación es bajo (IB=2).

Nivel 3, se caracteriza también por tener una baja icnodiversidad y también baja abundancia, se presentan *Palaeophycus* isp., *Psilonichnus* isp., y *Skolithos* isp. El índice de bioturbación es bajo (IB=1), estas trazas se encuentran dentro del estrato, sin embargo, la fábrica sedimentaria no está totalmente interrumpida.

Nivel 4 y 5, presentan similitudes en cuanto a la icnodiversidad, ésta es baja, sin embargo, la abundancia es ligeramente más alta con respecto al nivel 3, hay presencia de *Chondrites targonii*, *Planolites* isp., y *S. sinuosus*, en el plano de estratificación se observan como densas poblaciones de *Planolites*, mientras que dentro del estrato hay evidencias de moteados de este mismo icnogénero, el IB=2.

Nivel 6, contiene trazas asignadas a *Diplocraterion* isp, *Ophiomorpha* isp, *Skolithos* y *S. sinuosus*, el IB=1-2.

En la Curva, se identificaron tres niveles con icnofauna. En los niveles 1 y 2, se registraron a *Skolithos* y *Diplocraterion*, el IB=1, así como de trazas de escape escasas, la fábrica sedimentaria no se ve totalmente destruida, pero en algunas zonas hay presencia de estas trazas interrumpiendo el estrato. En el nivel 3, la icnodiversidad es también baja y se presenta solo

Ophiomorpha isp., sin embargo, la abundancia de estas galerías es alta, encontrándose distribuida en todo el paquete de rocas (IB=2).

En La Presa la icnodiversidad es alta, se localizaron cinco niveles con icnofauna. Como se ha mencionado anteriormente, estos niveles presentan diferencias en cuanto a la icnodiversidad, abundancia y el grado de bioturbación.

Nivel 1, se presentan *Arenicolites* isp. y *Skolithos linearis*, el IB=1.

Nivel 2, se registró la presencia de *Skolithos linearis* y *Thalassinoides* isp., con un IB=1-2.

Nivel 3, hay presencia de *Lockeia* isp., *Protovirgularia dichotoma*, *Rosselia* isp, *S. sinuosus*, y *Skolithos linearis*, en este nivel la icnodiversidad es alta como también la abundancia, el IB=3. En zonas intermedias de los estratos, la fabrica sedimentaria se ve totalmente interrumpida.

Nivel 4, se caracteriza por tener muy baja icnodiversidad y abundancia, se presentan *S. sinuosus* y *Skolithos linearis*, el IB=1.

Nivel 5, muestra similitudes con el nivel 3 en cuanto a la icnofauna, se diferencian porque en el nivel 5 hay presencia de galerías grandes y robustas de *Thalassioides* isp. y *Ophiomorpha nodosa*, el IB=2.

Tabla 5. *Tiering*, estrategias de comportamiento y categorías arquitecturales de los icnotaxones reportados en este trabajo, basada en Buatois *et al.* (2017).

Ichnogénero	<i>Tiering</i>	Estrategías	Categoría arquitectural
<i>Arenicolites</i>	Profundo	Estructuras de vivienda por organismos suspensívoros o detritívoros.	Formas en “U”
<i>Chondrites</i>	Profundo	Estructuras de alimentación provocadas por depositívoros y comportamiento de quimiosimbiontes.	Galerías con un eje hacia abajo y con ramificaciones.
<i>Diplocraterion</i>	Profundo	Trazas de equilibrio	Simple formas en “U”
<i>Lockeia</i>	Somero	Trazas de locomoción provocadas por depositívoros.	Trazas aisladas o en serie en forma de almendra.
<i>Ophiomorpha</i>	Profundo	Estructuras de vivienda y alimentación	Galerías tipo laberinto.
<i>Palaeophycus</i>	Somero	Estructuras de vivienda provocadas por suspensívoros.	Trazas vericales y con relleno pasivo.
<i>Planolites</i>	Somero	Estructuras de alimentación por depositívoros.	Galerías horizontales, con relleno activo.
<i>Protovirgularia</i>	Somero	Estructuras de descanso.	Trazas en forma de chevrón.
<i>Psilonichnus</i>	Profundo	Estructuras de vivienda y alimentadores depositívoros y suspensívoros.	Formas en “U” y “Y”.
<i>Rosselia</i>	Medio a profundo	Estructuras de vivienda por organismos suspensívoros.	Madrigueras verticales, rellenas concéntricamente.
<i>Sinusichnus</i>	Profundo	Estructuras de vivienda o de alimentación.	Galerías tipo laberinto.
<i>Skolithos</i>	Profundo	Estructuras de vivienda por organismos suspensívoros.	Galerías verticales no ramificadas.
<i>Thalassinoides</i>	Profundo	Estructuras de vivienda por organismos suspensívoros.	Galerías tipo laberinto.

5.2 Consideraciones paleoambientales

5.2.1 El Rebaje

En El Rebaje, no se reconocieron estructuras sedimentarias mayores. La parte basal se compone de capas de lutita intercaladas con limolita que afloran sobre el corte de la carretera Gral. Terán-China. El afloramiento Rancho El 7, consta de capas de arenisca fina a media con contenido icnológico, principalmente *Ophiomorpha* correspondiente a la Icnofacies de *Skolithos*, las cuales se ven limitadas en la parte superior por una superficie erosiva a partir de la cual se inicia un depósito de concentraciones de conchas del género *Venericardia*, cuyo depósito se interpreta en la zona de tormentitas proximales, de acuerdo con sus características tafonómicas. La parte superior de esta localidad aflora en el Rancho Chirinos. En este punto, las características son similares a la parte media; sin embargo, hay presencia de *Chondrites* cf. *intricatus* asociado con *Ophiomorpha* isp.

Como ya se ha mencionado, en esta localidad hay capas con concentraciones de *Venericardia*. Este género de bivalvo se ha considerado un fósil índice de rocas marinas del Cenozoico (Paleoceno y Eoceno) en Norteamérica y Europa (Park, 1968). En la Planicie Costera del Golfo de México, el registro paleontológico de *Venericardia* se distribuye ampliamente, con una diversidad de aproximadamente de 60 especies reportadas durante el Paleógeno y Neógeno (Ivany *et al.*, 2004; Sessa *et al.*, 2012). En México se ha reportado en la Cuenca de Burgos (Gardner 1945; Perrilliat 1963) y en el Grupo Difunta específicamente en la Formación Encinas (Vega y Perrilliat 1989).

Morfológicamente se caracterizan por tener conchas robustas, compuestas de aragonito y mostrar una alta diversidad en la ornamentación externa, incluyendo variación en el tamaño y forma de las costillas (Gardner y Bowles, 1937; Heaslip, 1968). El género se divide en dos subgéneros *Venericor* que incluye a todos los planicostata de la Planicie Costera e incluye solo a especies del Paleoceno y Eoceno (Gardner, 1945; Gardner y Bowles, 1937; McClure y Lockwood, 2015); y *Glyptoactis*, que incluye a la mayoría de los alticostata, los cuales tienen un registro más amplio dentro del Paleógeno y Neógeno (Heaslip, 1968).

Sus hábitos de vida se caracterizaban por ser organismos suspensívoros infaunales, que vivían enterrados en la interfase agua sedimento (Heaslip, 1968; McClure y Lockwood, 2015),

en zonas sublitorales cercanas a la costa con condiciones de baja energía y en sustratos arenosos que proporcionaban buenas condiciones de oxigenación (Temelkov y Andrew, 2005) (Figura 52).

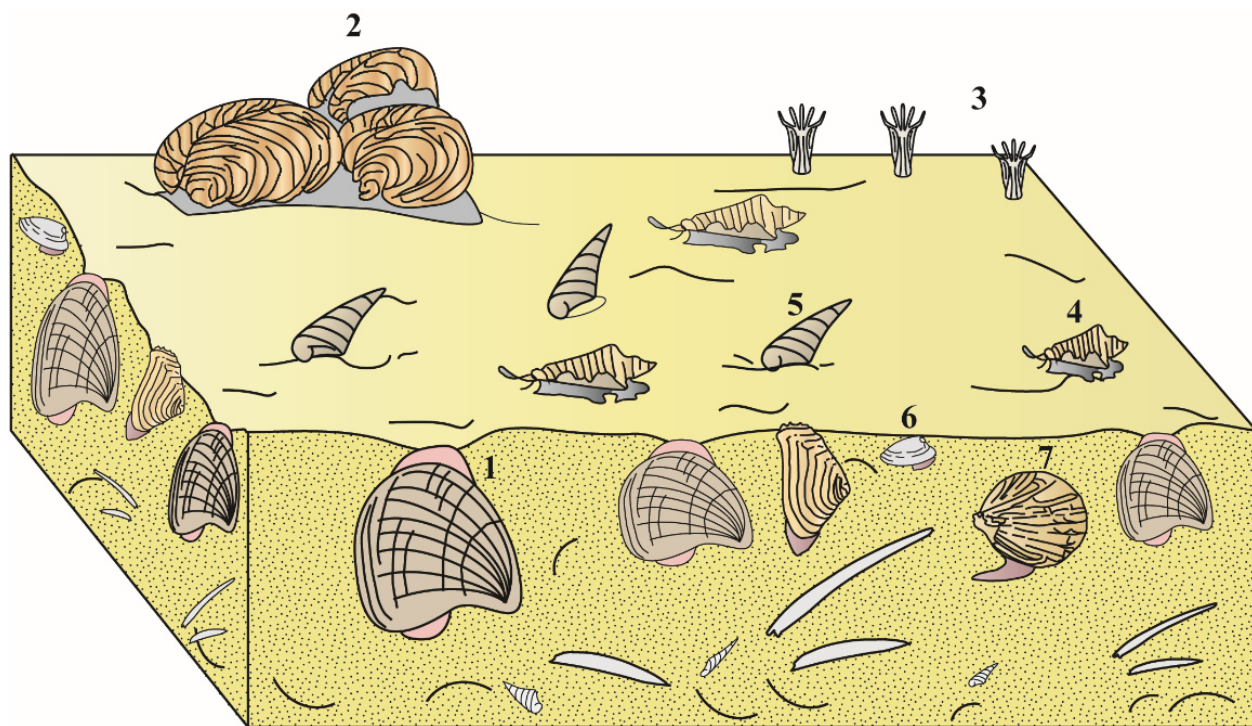


Figura 52. Reconstrucción paleoambiental de los hábitos de vida de una comunidad marina de invertebrados durante el Cenozoico. 1) *Venericardia*; 2) *Chama squamosa*; 3) *Turbinolia*; 4) *Conus scrabacula*; 5) *Turritella imbricata*; 6) *Nucula similis*; 7) *Glycymeris deletus* (Esquema modificado de McKerrow, 1978).

Gardner y Bowles (1937) describieron a la *Venericardia* (*Venericor*) *zapatai*, en localidades del noreste de México dentro de la CB y que pertenecen a la Formación Wilcox. De igual manera Perrilliat (1963), confirmó esta información. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano en su mapa geológico, ambas localidades pertenecerían a la parte superior de la Formación Midway, del Paleoceno medio (Echánove, 1986; Eguiluz, 2011a). Sin embargo, la presencia de la especie determinada en este trabajo, *Venericardia* (*Venericor*) *zapatai*, sugiere que las capas portadoras del bivalvo forman parte de la Formación Wilcox (Thaetiano-Ypresiano), como también ya había sido sugerido por Perrilliat (1963).

Las características tafonómicas del registro de *V. (V.) zapatai*, en la localidad del Rebaje, indican que fueron removidas y sepultadas fuera de su posición de vida, sin sufrir mayor

transporte. Estas se pueden interpretar como acumulaciones monotípicas de origen sedimentológico y parautoctonas, de acuerdo con el modelo de Kidwell *et al.* (1986).

La orientación de las valvas en forma variable y convexa hacia arriba evidencia que se depositaron bajo corrientes unidireccionales en un medio de baja energía y transporte moderado o rápido. El apilamiento de las valvas ya sea convexa hacia arriba o hacia abajo, se ha asociado con depósitos de tormentas y es el resultado de la interferencia entre las valvas durante el transporte (Kidwell y Bosence, 1991). La geometría se presenta como capas de bivalvos, las cuales se encuentran ampliamente extendidas en el afloramiento, cuya superficie representa un pavimento. La mayoría de las valvas están desarticuladas, algunas fragmentadas y orientadas de manera concordante a la estratificación.

Fürsich (1995) propuso un esquema de clasificación para las concentraciones de conchas basadas en sus procesos de generación (olas, corrientes, actividad y productividad biológica, sedimentación neta y tiempo de formación). Dentro de este esquema las concentraciones de *Venericardia*, se originaron en la parte de tempestitas proximales (Figura 53), en donde los elementos que componen a las concentraciones se caracterizan por exhibir señales de transporte, conchas que generalmente están bien preservadas, desarticuladas y tienen una orientación preferencial convexa hacia arriba y tienen una base erosiva tajante o gradacional. Se relacionan también con el tiempo de formación de las concentraciones y su posición dentro de un perfil de playa. La orientación o posición de las trazas fósiles dentro del sustrato arrojan importante información de las condiciones ambientales, tales como el nivel de energía del ambiente o la tasa de sedimentación (Seilacher, 1953).

Dentro del registro geológico las concentraciones de conchas son comunes en ambientes transicionales (Wilmsen, 2012), por ejemplo acumulaciones de conchas Jurásicas de la cuenca Kachchh como una característica principal en la base de un tracto sistema transgresivo (HST), (Fürsich 1995; Fürsich *et al.* 2013), y en el Cretácico inferior de la Formación Chachao en Argentina (Palma y Lanés, 2001). Estos bioeventos, fueron especialmente abundantes durante el Paleógeno (Wilmsen, 2012).

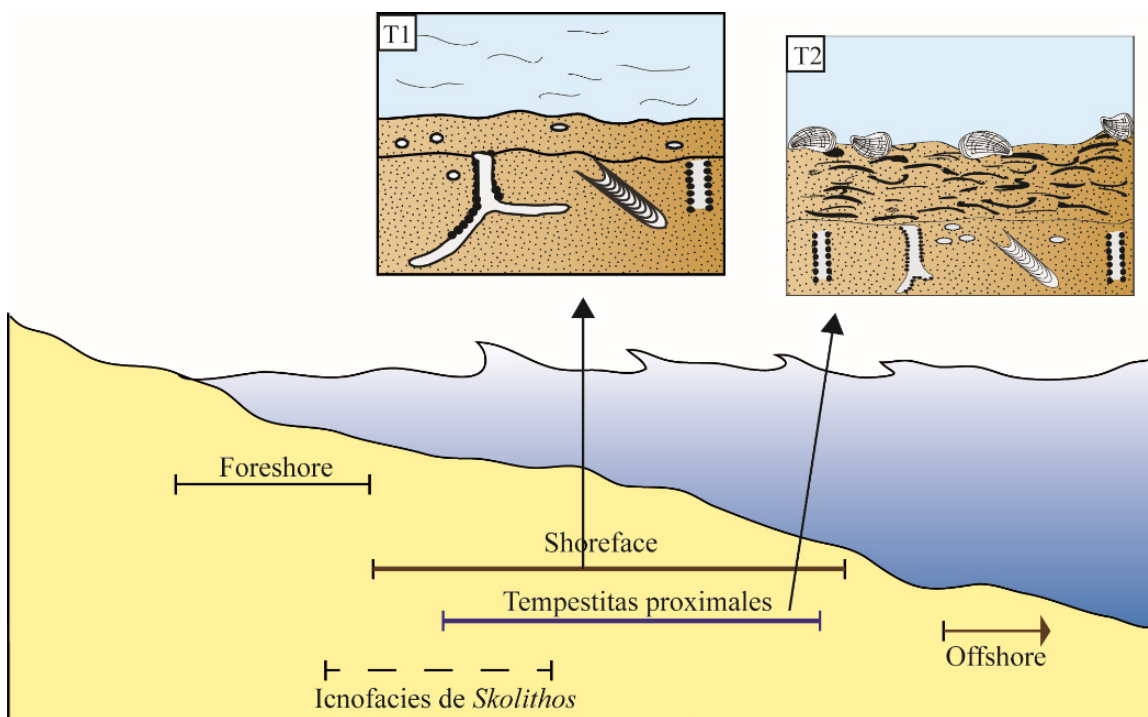


Figura 53. Modelo de depósito propuesto para la localidad El Rebaje.

En el registro icnológico de los afloramientos analizados, se encuentran elementos de la Icnofacies *Skolithos*, con baja icnodiversidad y baja abundancia, dominados por la presencia de *Ophiomorpha* isp. y en menor proporción *Chondrites* cf. *intricatus*. Como característica particular, una superficie erosiva divide la icnoasociación de las capas de concentraciones de conchas, este tipo de registro también se han reportado en la cuenca de Sabinas, en el estado de Coahuila (Gray *et al.*, 2008).

La icnoasociación de trazas fósiles, se interpreta que se desarrolló en medios de alta energía activados por olas y mareas, características comunes en zonas costeras (MacEarchern *et al.*, 2007). La presencia de *Ophiomorpha* cf. *nodosa* y *Ophiomorpha* isp. ubicadas en la litofacies Arf-m, sugieren una probable conexión con barras arenosas ubicadas en una zona costera, donde organismos oportunistas colonizaron estos ambientes, siendo la diversidad y abundancia bajas (IB=1). Se presentan diferentes morfologías de *Ophiomorpha*, las cuales estas se generan por un continuo cambio de la línea de costa en ambientes marino-marginales (Fürsich *et al.* 2018).

Asociaciones similares de *Ophiomorpha* y *Chondrites*, también se han registrado en áreas del noreste de México (Ekdale y Stinnesbeck 1998), en donde se interpretó que hubo repetidos eventos de depósito relacionados con condiciones de alta energía y altas tasas de sedimentación,

que quizás pudieron extenderse por varios meses o años. La presencia de *Chondrites* cf. *intricatus* puede sugerir condiciones de baja oxigenación y altas tasas de sedimentación.

El depósito de esta localidad tiene similitudes con otros reportados para el Paleógeno en Japón en el Grupo Ashiya con ciclos sedimentarios compuestos de arenisca con contenido icnológico, seguido de concentraciones de bivalvos y limolitas relacionados con la elevación del nivel del mar o pequeñas transgresiones de periodos cortos (Sakakura, 2002).

5.2.2 San José de las Lajas

La asociación de conchas de *Venericardia* se reconoció también en la parte basal de la localidad San José de las Lajas, y corresponde a la litofacies Arb. Sin embargo, la dimensión del afloramiento es menor que en El Rebaje. A pesar de esto, se interpreta que ocupan el mismo nivel estratigráfico, esto con base en el análisis de imágenes satelitales. El sedimento en el que están embebidas las conchas es más fino que en El Rebaje, lo que podría estar relacionado con un nivel de energía menor, indicando una posición más profunda o distal que su equivalente en El Rebaje.

En esta localidad, la columna estratigráfica contiene más horizontes de arenisca que de limolitas, con granulometría fina a media. El contenido icnológico también es mayor, y empieza inmediatamente después de las concentraciones de *Venericardia*. En la parte basal, dentro de la litofacies Arf, los principales constituyentes icnológicos son *Chondrites targonii*, *Ophiomorpha* isp. y *Planolites* isp. Esta icnoasociación se interpreta como parte de la Icnofacies *Skolithos*, característica de ambientes de plataforma somera, entre el nivel del oleaje normal y oleaje de tormenta (zona de rompiente o *Shoreface*). Asociaciones similares fueron reportadas por Ekdale y Stinnesbeck (1998) como parte de un ambiente nerítico somero. La presencia de estos icnotaxones revela el predominio de estrategias de alimentación que consisten en una variedad de trazas como *Domichnia*, *Fodinichnia* y *Chemichnia*, los cuales fueron producto de organismos depositívoros (Lababdeira *et al.* 2016) en condiciones ambientales relativamente tranquilas.

La parte media de esta localidad se caracteriza por capas heterolíticas granocrecientes conformadas de capas cíclicas de lutita, limolita y arenisca correspondientes a la litofacies Lf-ArF, estas últimas contienen icnoasociaciones de *Sinusichnus sinuosus* y en menor proporción *Skolithos* isp. (nivel 2). Las características sedimentológicas e icnológicas se relacionan con

ambientes marinos someros, donde la granulometría granocreciente indica somerización del tirante de agua y el establecimiento de organismos productores de *Sinusichnus sinuosus* y *Skolithos* isp. los cuales pudieron colonizar bajo condiciones ambientales de estrés. Características similares fueron reportadas por Beláustegui *et al.* (2013) del Mioceno en España, donde *S. sinuosus* es abundante y las asociaciones sedimentológicas están constituidas por intercalaciones centimétricas granocrecientes de lutita, limolita y arenisca en condiciones costeras de alta energía.

Otro ciclo está representado por la presencia de *Palaeophycus* isp., *Psilonichnus* isp. y *Skolithos* isp. (nivel 3), dentro de la litofacies LF-Arf. La presencia del icnogénero *Psilonichnus*, refiere a condiciones ambientales sumamente someras, por encima de la línea de costa o *foreshore* (Netto y Grangeiro 2010). Este icnogénero también se ha registrado en zonas estuarinas con influencia de mareas dentro de la Icnofacies *Skolithos* (Nesbitt y Campbell, 2006). Las propiedades sedimentológicas en ambos niveles son similares (nivel 2 y 3) indicando que fueron zonas que se desarrollaron con condiciones ambientales equivalentes, zona del *shoreface* superior, y relacionadas a la icnofacies de *Skolithos*. Las icnoasociaciones se relacionan con estrategias combinadas de alimentación, (Fodinichnia/Agrichnia) y vivienda (Domichnia).

En la parte media de la columna están presentes icnoasociaciones de *Chondrites* isp., *Planolites* isp. y *Sinusichnus sinuosus* dentro de la sublitofacies Arf. La laminación interna en el orden de milímetros de arenisca y limolita es la característica sedimentaria más sobresaliente, interrumpida por pequeños intervalos de laminación cruzada y en la parte superior hay grietas de desecación. Estas características sedimentarias se han interpretado como típicas de ciclos mareales semidiurnos, donde las corrientes son dirigidas hacia el interior del continente (inundación) y hacia el mar (reflujo) (Daidu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2019). Las trazas fósiles que se han relacionado con estas condiciones son *Chondrites*, *Planolites*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus* y *Asterosoma*, indicando escenarios de aguas salobres (Buatois *et al.*, 2012). Estas trazas fósiles que se identificaron en este nivel abundan *S. sinuosus* y *Planolites*, las cuales se pueden relacionar con condiciones de estrés, ya que, aunque son abundantes, no lograron penetrar el sustrato, siendo algunas estructuras moteadas relacionadas con *Planolites*, las que se encuentran dentro del estrato. *Chondrites* se ubica en la parte inferior y también es abundante, aunque en el registro geológico generalmente se ha reportado en ambientes profundos (Fu, 1991; Uchman *et al.*, 2003) en ambientes actuales se ha localizado en depósitos intermareales y

submareales, donde las estrategias son principalmente de alimentación (Hertweck *et al.* 2007). Por lo tanto, la icnoasociación en general se relaciona con condiciones de estrés por la presencia de grietas de desecación, por lo que se infieren condiciones de alta salinidad y altos niveles de evaporación, ubicado en la zona intermareal.

De acuerdo con lo antes mencionado y siguiendo con la sucesión de litofacies e icnoasociaciones, hay evidencias de una somerización del ambiente, pasando desde la zona de tormentitas ubicadas en el *shoreface* hasta la zona intermareal en el *nearshore*. En la parte superior de la localidad, en la litofacies Arf-m, se encuentra una icnoasociación conformada por *Sinusichnus sinuosus*, *Diplocraterion* isp., *Skolithos* isp y *Ophiomorpha* isp. (nivel 6). Dominan estructuras verticales con estrategias de habitación (Domichnia) o alimentación por suspensión (*Diplocraterion*, *Skolithos* y *Ophiomorpha*), sobre las horizontales (*Sinusichnus sinuosus*). La presencia de *S. sinuosus*, indica la colonización de crustáceos juveniles en donde las estrategias de alimentación (Agrichnia) probablemente fueron producidas como trampas de captura de meiofauna (Gibert *et al.*, 2006).

Las capas de arenisca, donde se encuentra esta icnoasociación, están muy oxidadas en la superficie y en secciones delgadas hay minerales opacos, dando indicios de condiciones reductoras o altas tasas de sedimentación. Mientras que la baja intensidad de bioturbación puede confirmar estas condiciones ambientales asociadas a zonas intermareales con elementos de la icnofacies proximal *Cruziana* en transición con la Icnofacies de *Skolithos* (Buatois y Mángano, 2011).

5.2.3 La Curva

La parte superior de la localidad de San José de las Lajas hay depósitos de arenisca de grano medio a grueso con estratificación tipo *hummocky*, éstas también se encuentran en la localidad La Curva.

La parte basal se caracteriza por pequeñas capas de arenisca con estratificación *hummocky* y *swaley*, intercaladas con pequeñas capas de limolitas, correspondientes a la litofacies Arm-g, la icnoasociación se compone de *Skolithos* y *Diplocraterion* (nivel 1 y 2), la bioturbación de estos elementos es muy baja (IB=1). La alternancia de capas de arenisca con estratificación tipo *hummocky* y *swaley*, y limolitas infieren que se presentaron ciclos de

tormentas, en donde el sedimento más fino refleja depósitos post-tormentas, y las capas de arenisca acción de las olas (Johnson y Baldwin, 1996).

La presencia de *Diplocraterion* y *Skolithos* y estructuras de escape reflejan el establecimiento de organismos oportunistas con estrategias de alimentación por suspensión, donde quedaron evidenciadas ventanas de colonización. Estos dos icnogéneros se relacionan con la Icnofacies *Skolithos*, en la que las condiciones ambientales son de alta energía, con presencia de estructuras verticales (MacEachern *et al.*, 2007b).

Las estructuras sedimentarias y las trazas fósiles aquí descritas, caracterizan a un ambiente de *shoreface* inferior por debajo de la base de olas de buen tiempo y dentro de la base de olas de tormentas (Vossler y Pemberton, 1989; Pemberton *et al.*, 2012). Estos depósitos también se han registrado en sistemas de deltas dominados por las olas en zonas de frente deltaico en la Formación Wilcox en Texas (Zhang *et al.*, 2019), la cual se caracteriza por tener frecuentes e intensas tormentas (Buatois y Mángano, 2011).

Después de los depósitos ciclos de tormentas, hay un paquete grueso de arenisca media, sin contenido icnológico y sin estructuras sedimentarias.

La parte superior está representada por capas de arenisca con estratificación ondulada. Como elemento icnológico se presenta exclusivamente *Ophiomorpha* isp. (nivel 3), la cual se encuentra colonizando varias capas, este estilo de colonización se ha denominado colonizadores multicapa (Buatois y Mángano, 2011), donde las altas tasas de sedimentación pudieron provocar el desplazamiento de los organismos hacia la superficie. Las estructuras sedimentarias y la presencia de *Ophiomorpha* isp. se relaciona con Icnofacies *Skolithos*.

5.2.4 La Presa (Formación Reklaw)

Esta localidad se interpreta que es parte de la Formación Reklaw, siguiendo el mapa geológico del Servicio Geológico Mexicano, generalmente en las capas de esta formación no se ha reportado con anterioridad contenido biogénico.

En esta localidad, la parte inferior se encuentra dominada por lutitas intercaladas con pequeñas capas de arenisca (litofacies LArf) indicando probablemente un ambiente más profundo en comparación con la localidad de La Curva (Formación Wilcox). Cabe mencionar

que en estas capas no hay presencia de trazas fósiles o contenido biogénico, se interpreta que este depósito se localiza en una zona *shoreface* inferior.

Las primeras capas de la sección con contenido icnológico contienen a *Arenicolites* isp. y *Skolithos linearis* en arenisca fina a media con estratificación cruzada y con ondulitas simétricas en la base (nivel 1), relacionadas con la litofacies Arf-m. Estos icnotaxones se relacionan con condiciones de alta energía, representando estrategias de alimentación por organismos depositívoros. Hacia la superficie se localizan trazas de *Skolithos linearis* y *Thalassinoides* (nivel 2); las características litológicas son similares que en el nivel 1, sin embargo, hay presencia de restos de plantas y moldes de bivalvos, dando indicios de una zona con influencia continental y las estrategias de alimentación están dominadas por organismos suspensívoros y depositívoros. De acuerdo con estas características, estos niveles se asocian con la Icnofacies *Skolithos* donde los regímenes de alta energía son típicos.

La parte media se identifica por tener intercalaciones de arenisca y lutita dentro de la litofacies Arf-m, en las capas de arenisca son las zonas donde se presentan icnoasociaciones y están representadas por *Lockeia* isp., *Protovirgularia dichotoma*, *Rosselia* isp., *Sinusichnus sinuosus* y abundantes galerías de *Skolithos linearis* (nivel 3). Esta agrupación de trazas representa uno de los niveles con mayor icnodiversidad y bioturbación (IB=2). El incremento de la abundancia de icnotaxones se ha interpretado que cuando las condiciones ambientales (tales como baja tasa de sedimentación, buena oxigenación, salinidad normal, baja energía) son favorables para los organismos éstos tienen a colonizar el sustrato con mayor éxito. Las condiciones ambientales y la asociación de trazas fósiles se han relacionado con la Icnofacies *Cruziana* (MacEachern *et al.*, 2007a; Buatois y Mángano 2011), ubicada en la zona de *shoreface* superior, donde las trazas realizadas por bivalvos, poliquetos y crustáceos tienen estrategias afines a locomoción (Repichnia), descanso (Cubichnia), alimentación (Fodinichnia) y vivienda (Domichnia).

La parte superior en las capas de arenisca con laminación interna muy tenue, ripples de simétricas y de interferencia están asociados a la litofacies Arf en los niveles 4 y 5, donde las icnoasociaciones están representadas por *Ophiomorpha nodosa*, *Rosselia* isp., *Skolithos linearis*, *Sinusichnus sinuosus* y *Thalassinoides* isp. Hay una clara presencia de trazas realizadas por crustáceos (*O. nodosa*, *S. sinuosus* y *Thalassinoides* isp.) formando sistemas de estrategias de alimentación (Domichnia), además el tamaño de estas galerías es mayor que al de los otros

niveles, indicando altas tasas de oxigenación, condiciones de energía bajas y bajas tasas de sedimentación (Bromley 1996). Las asociaciones se relacionan con la icnofacies de Cruziana donde elementos como *O. nodosa*, *Thalassinoides* y *S. sinuosus* son típicos. Las condiciones ambientales que se presentan en esta icnofacies son estables en cuanto la energía hidrodinámica, permitiendo el establecimiento de los organismos en zonas costeras. Sin embargo, la presencia de *Rosselia* isp. y *Skolithos linearis*, elementos típicos de la Icnofacies *Skolithos*, dan indicios de la presencia de estas dos icnofacies, además de condiciones ambientales muy cambiantes.

En general, la parte inferior de esta sección se relaciona a una zona profunda (representado en la parte inferior por estratos de lutitas, y sin contenido icnofósil) en transición a una zona somera o *Shoreface* (capas e icnofósiles típicos de la Icnofacies *Skolithos* y una mezcla de la Icnofacies *Cruziana*), así como también estructuras sedimentarias asociadas a alta energía por acción de las olas, que de acuerdo a las características icnológicas, las condiciones ambientales fueron óptimas para el establecimiento de los organismos.

5.3 Generalidades

De acuerdo con las características sedimentológicas e icnológicas de las localidades analizadas, se presenta un modelo esquemático que representa la progradación de la línea de costa con dirección hacia el oeste (Figura 54) en donde, las localidades el Rebaje y San José de las Lajas formarían parte del *shoreface* inferior en la zona de tormentitas (Figura 54 A). Hacia la parte superior de la columna en San José de las Lajas 2 y La Curva representarían esta misma zona de tormentitas (Figura 54 B), sin embargo, la presencia de acumulaciones de *Venericardia* no están presentes, posiblemente por la instauración de un sistema deltaico que inhibió el desarrollo de barras. En la localidad La Presa, como parte del *shoreface* superior, las características sedimentológicas y sobre todo icnológicas, dan indicios de zonas estables ambientalmente y someras cercanas al *foreshore* (Figura 54 C). La presencia de icnitas en arenisca que componen el dique de la presa, El Cuchillo en la localidad de la Presa, implicaría la entrada de la zona de *backshore*, un poco más al oeste de esta localidad (Figura 54 D).

En el sur de Texas se ha interpretado que el límite entre las formaciones Wilcox y Reklaw (Eoceno inferior-medio) se relaciona con una gran variabilidad de ambientes sedimentarios

desde sistemas fluviales, deltas dominados por las olas y sistemas costeros, esto asociado una compleja trayectoria de la línea de costa donde se han registrado numerosos ciclos regresivos y transgresivos, que representan episodios múltiples de retroceso y avance de la línea de costa (Ambrose *et al.* 2018). Recientemente también en el sur de Texas, se han redefinido los ambientes de depósito que antiguamente se habían manejado como deltas fluvio-dominados, sin embargo, por medio de análisis sísmicos y de núcleos de pozo muestran una compleja división subambiental donde actuaron procesos de mareas, olas y fluviales, tanto en ambientes deltaicos como costeros (Zhang *et al.*, 2019).

De acuerdo con lo antes mencionado, algo similar pasó en la Cuenca de Burgos durante el intervalo Paleoceno-Eoceno, donde la alta variabilidad de sedimentación dio origen a zonas dominadas por costas y otras dominadas por pequeños deltas, siempre manteniendo una progradación de la línea de costa. Esto quedó evidenciado en la variabilidad de icnofauna que se presenta en las localidades estudiadas, donde hay periodos con baja bioturbación (Icnofacies *Skolithos*) y en algunas ocasiones esta incrementa (Icnofacies *Cruziana*), siempre asociados a capas de arenisca.

CONCLUSIONES

Se considera a las trazas fósiles como indicadores paleoambientales, y se concluye que el análisis integral de aspectos sedimentológicos e icnológicos es necesario para poder interpretar un paleoambiente.

- El estudio icnológico en las Formaciones Wilcox y Reklaw, permitió identificar a las trazas fósiles a nivel icnogénico e icnoespecífico. Las determinaciones icnotaxonómicas incluyen el reconocimiento de:
 - Formación Wilcox, ocho icnogéneros (*Chondrites* isp., *Diplocraterion* isp., *Ophiomorpha* isp., *Palaeophycus* isp., *Planolites* isp., *Pylonichnus* isp., *Sinusichnus* isp. y *Skolithos* isp.), Dos icnoespecies *Chondrites targonii* y *Sinusichnus sinuosus* y una icnoespecie asignada con duda a *Chondrites* cf. *intricatus*.
 - Formación Reklaw, ocho icnogéneros (*Arenicolites* isp., *Lockeia* isp., *Ophiomorpha* isp., *Protovirgularia* isp., *Rosselia* isp., *Sinusichnus* isp., *Skolithos* isp., y *Thalassinoides* isp.) y cuatro icnoespecies (*Ophiomorpha nodosa*, *Protovirgularia dichotoma*, *Sinusichnus sinuosus* y *Skolithos linearis*).
- Las trazas fósiles se agruparon en icnoasociaciones y se relacionaron a las Icnofacies *Skolithos* y *Cruziana*. En algunas ocasiones se identificó una mezcla entre estas dos icnofacies. Las principales estrategias de comportamiento que se identificaron fueron: *Domichnia*, *Fodinichnia*, *Repichnia*, *Cubichnia* y *Equilibrichnia*.
- La caracterización y análisis de las litofacies permitió interpretar los procesos sedimentarios y de depósito en el que se desarrolló la mayor parte de la Formación Wilcox y parte de la Formación Reklaw, dando indicios de ambientes dominados por olas y mareas, donde las condiciones ambientales eran propios de zonas costeras (*shoreface*) y en donde el aumento o disminución del nivel del mar fue afectado por pequeñas transgresiones y regresiones.
- Las características tafonómicas de las concentraciones de *Venericardia* en las localidades El Rebaje y San José de las Lajas de la Formación Wilcox representan los

únicos macrofósiles presentes en las áreas analizadas, y se interpretaron como depósitos de tormentitas proximales y distales.

- Tradicionalmente se han extrapolado las condiciones paleoambientales del sur de Texas durante el Paleoceno tardío y Eoceno temprano en el noreste de México. Sin embargo, hay una alta variabilidad de subambientes que se desarrollaron a lo largo de la Planicie Costera del Golfo de México, sobre todo en este intervalo de tiempo, donde el suministro de sedimentos fue diferente en cada región. En la Cuenca de Burgos no se han reconocido los deltas a gran escala que se han identificado en el sur de Texas, solo algunos deltas secundarios que dominaron el ambiente de depósito posteriormente, del Eoceno medio al Oligoceno.
- El análisis petrográfico permitió identificar los principales tipos de arenisca que caracterizan a las rocas analizadas; el mineral accesorio con mayor abundancia fue la glauconita, confirmando el paleoambiente de condiciones principalmente costeras.

En este trabajo se dio importancia a las características sedimentológicas como son la litología, y las características petrográficas de las rocas (tamaño de granos, clasificación (sorting), escalas y tipos de estructuras sedimentarias primarias o diagénéticas), los cuales nos dieron información acerca del sustrato en que se desarrollaron los organismos y de alguna manera ayudaron a las interpretaciones paleoambientales. Es así como se va construyendo las asociaciones icnofaunísticas que nos cuentan también algunos de los procesos geológicos durante el desarrollo y preservación.

BIBLIOGRAFÍA

- Alpert, S. P. 1974. Systematic Review of the Genus *Skolithos*. *Journal of Paleontology*, 48 (4): 661–669.
- Ambrose, W., Zeng, H., Olariu, M., Zhang, J. 2018. Depositional History and Shoreline Evolution of the Upper Wilcox Group and Lower Reklaw Formation , Northern Bee County, Texas. ACE 2018 Annual Convention and Exhibition.
- Archer, A., Maples, C. G. 1984. Trace-fossil distribution across a marine to nonmarine gradient in the Pennsylvanian of southwestern Indiana. *Journal of Paleontology*, 58 (2): 448–466.
- Belaústegui, Z. 2013. Recurrent constructional pattern of the crustacean burrow *Sinusichnus sinuosus* from the Paleogene and Neogene of Spain. *Acta Palaeontologica Polonica* 52(2): 461–474.
- Bown, T. M., Ratcliffe, B. C. 1988. The origin of *Chubutolithes* Ihering, ichnofossils from the Eocene and Oligocene of Chubut Province, Argentina. *Journal of Paleontology*, 62 (2): 163–167.
- Bromley, R. G. 1996. Trace fossils. Biology , taphonomy and applications. Chapman and Hall, London, .
- Bromley, R. G., Frey, R. W. 1974. Redescription of the trace fossil *Gyrolithes* and taxonomic evaluation of *Thalassinoides*, *Ophiomorpha* and *Spongeliomorpha*. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 23: 311–335.
- Bryant, W. R., Lugo, J., Cordova, C., Salvador, A. 1991. Physiography and bathymetry. *In*: Salvador, A. (ed.), *The Geology of North America, The Gulf of Mexico Basin*, J. 13–30. Geological Society of America.
- Buatois, L. A., Mángano, M. G. 2008. Trazas fósiles de invertebrados. *In*: Camacho, H. H. y Longobucco, M. (eds.), *Los Invertebrados Fósiles*,. Fundación de Historia Natural Félix de Azara, Vázquez Mazzini, Buenos Aires. pp. 751–785
- Buatois, L. A. y Mángano, M. G. 2011. *Ichnology. Organism-Substrate Interactions in Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge, .
- Buatois, L. A., Macsotay, O., Quiroz, L. I. 2009. *Sinusichnus*, a trace fossil from Antarctica and Venezuela: Expanding the dataset of crustacean burrows. *Lethaia* 42 (4): 511–518.
- Buatois, L. A., Carmona, N. B., Curran, H. A., Netto, R. G., Mángano, M.G., Wetzel, A. 2016. The Mesozoic marine revolution. *In*: Mangano, M. G. y Buatois, L. A. (eds.), *The trace-fossils record of major evolutionary events*, 19–134. *Topics in Geobiology*, Springer, Dordrecht.
- Buatois, L. A., Wisshak, M., Wilson, M. A., Mángano, M. G. 2017. Categories of architectural designs in trace fossils: A measure of ichnodisparity. *Earth-Science Reviews*, 164: 102–181.
- Buatois, L. A., Santiago, N., Herrera, M., Plink-Björklund, P., Steel, R., Espin, M., Parra, K. 2012. Sedimentological and ichnological signatures of changes in wave, river and tidal influence along a Neogene tropical deltaic shoreline. *Sedimentology*, 59(5): 1568–1612.

- Cabrera, R., Lugo-Rivera, J. E. 1984. Estratigrafía Sedimentologica De Las Cuencas Terciarias del Golfo de México. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 36 (2): 3–55.
- Carmona, N., Buatois, L. A. 2003. Estructuras biogénicas de crustáceos en el Mioceno de la cuenca del Golfo San Jorge: implicancias paleobiológicas y evolutivas. Asociación Paleontológica Argentina Publicación Especial 9: 97–108.
- Carmona, N. B., Buatois, L. A., Mángano, M. G. 2004. The trace fossil record of burrowing decapod crustaceans: evaluating evolutionary radiations and behavioural convergence. Fossils and Strata, 51: 141–153.
- Carmona, N. B., Buatois, L. A., Mángano, M. G., Bromley, R. G. 2008. Ichnology of the lower Miocene Chenque Formation, Patagonia, Argentina: Animal - Substrate interactions and the modern evolutionary fauna. Ameghiniana, 45 (1): 93–122.
- Carmona, N. B., Mángano, M. G., Buatois, L. A., Ponce, J. J. 2010. Taphonomy and Paleoecology of the Bivalve Trace Fossil *Protovirgularia* in Deltaic Heterolithic Facies of the Miocene Chenque Formation, Patagonia, Argentina, 84 (4): 730–738.
- Carvalho, C. N. De, Viegas, P., Cachão, M. 2007. *Thalassinoides* and its Producer: Populations of Mecochirus Buried Within Their Burrow Systems, Boca Do Chapim Formation (Lower Cretaceous), Portugal. Palaios, 22 (1): 104–109.
- Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J. J., Molina-Garza, R. S., Arvizu-Gutiérrez, I. R. 2005. La falla San Marcos: una estructura jurásica de basamento multirreactivada del noreste de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(1): 27–52.
- CNH. 2018. Atlas Geológico Cuencas Sabinas-Burgos, 54 p.
- Crimes, T. P. 1977. Trace fossils of an Eocene deep-sea sand fan. In: Crimes, T. P. y Harper, J. C. (eds.), Trace fossils 2, 71–90. Geological Journal, Special Issue, 9, Liverpool.
- Crimes, T. P., Fedonkin, M. A. 1994. Evolution and Dispersal of Deepsea Traces. Palaios 9 (1): 74–83.
- Daidu, F., Yuan, W., Min, L. 2013. Classifications, sedimentary features and facies associations of tidal flats. Journal of Palaeogeography, 2 (1): 66–80.
- Dashgard, S. E., Ainsworth, R. B., MacEachern, J. A. 2017. Preferential Orientation of Shrimp-Generated *Diplocraterion parallelum* and Their Reliability As Paleocurrent Indicators. Palaios, 32(7): 429–438.
- Davies, D. J., Powell, E. N., Stanton, R. J. 1989. Taphonomic signature as a function of environmental process: Shells and shell beds in a hurricane-influenced inlet on the Texas coast. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 72 (3): 317–356.
- Dworschak, P. C. 2000. Global Diversity in the Thalassinidea (Decapoda). Journal of Crustacean Biology, 20 (2): 238–245.

- Dworschak, P. C., Felder, D. L., Tudge, C. C. 2012. Infraorders Axiidea de Saint Laurent, 1979 and Gebiidea de Saint Laurent, 1979 (formely known collectively as Thalassinidea). *In*: Schram, F. R., Vaupel Klein, J. C., von, Forest, J., Charmantier-Daures, M. (eds.), *Treatise on Zoology - Anatomy, Taxonomy, Biology. The Crustacea.*, 109–219. Interactive Factory, Leiden, The Netherlands.
- Echánove, O. 1986. Geología Petrolera de la Cuenca de Burgos (Parte I) Consideraciones geológico-petroleras. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 38: 1–39.
- Eguiluz de Antuñano, S. 2004. Tectónica Laramide en la Cuenca de Burgos, México, *Revista GEOS*, 24 (2): 307–308.
- Eguiluz de Antuñano, S. 2009. The Yegua Formation: Gas Play in the Burgos Basin, Mexico. *In*: Bartolini, C. y Román-Ramos, J. R. (eds.), *Petroleum Systems in the southern Gulf Of Mexico*, American Association of Petroleum Geologist, 49–77.
- Eguiluz de Antuñano, S. 2011a. Sinopsis geológica de la Cuenca de Burgos, noreste de Mexico: producción y recursos petroleros. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63 (2): 323–332.
- Eguiluz de Antuñano, S. 2011b. Estratigrafía, análisis de secuencias y control estructural en la Formación Yegua, Cuenca de Burgos, noreste de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63 (2): 171–181.
- Ehrenberg, K. 1944. Ergänzende Bemerkungen zu den seinerzeit aus dem Miozän von Burgschleinitz beschriebenen Gangkernen und Bauten dekapoder Krebse. *Paläontologische Zeitschrift*, 23: 345–359.
- Ekdale, A. A. 1985. Paleocology of the marine endobenthos. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 50: 63–81.
- Ekdale, A. A., Lewis, D. W. 1991. Trace fossils and paleoenvironmental control of ichnofacies in a late Quaternary gravel and loess fan delta complex, New Zealand. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 81 (3–4): 253–279.
- Ekdale, A. A., Stinnesbeck, W. 1998. Trace Fossils in Cretaceous-Tertiary (KT) Boundary Beds in Northeastern Mexico: Implications for Sedimentation during the KT Boundary Event. *Palaos*, 13 (6): 593.
- Ekdale, A. A., Bromley, R. G. 2001. A day and a night in the life of a cleft-foot clam: *Protovirgularia-Lockeia-Lophoctenium*. *Lethaia*, 34 (2): 119–124.
- Ekdale, A. A., Bromley, R. G. y Pemberton, S. G. 1984. *Ichnology: The Use of Trace Fossils in Sedimentology and Stratigraphy*. SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Fillion, D. 1989. Les critères discriminants a l'intérieur du triptyque *Palaeophycus-Planolites-Macaronkhnus*. Essai de synthèse d'un usage critique. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris* 2, (309): 169–172.
- Fillion, D., Pickerill, R. K. 1990. Ichnology of the Upper Cambrian? To Lower Ordovician Bell

- Island and Wabana groups of eastern Newfoundland, Canada. *Paleontographica Canadiana*, 7: 1–119.
- Flawn, T. P., Goldstein, A. J., King, B. P., Weaver C.E. 1961. The Ouachita System. Vol. 6120. Bureau of Economic Geology Publication, Austin, Texas, .
- Folk, R. L., Andrews, P. B., Lewis, D. W. 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in new zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13 (4): 937–968.
- Frey, R. W., Seilacher, A. 1980. Uniformity in marine invertebrate ichnology. *Lethaia*, 13 (3): 183–207.
- Frey, R. W., Howard, J. D. 1985. Upper Cretaceous Trace Fossils, book *Cliffs of Utah: A Field Guide*: 115–152.
- Frey, R. W., Pemberton, S. G. 1987. The *Psilonichnus* ichnocoenose, and its relationship to adjacent marine and nonmarine ichnocoenoses along the Georgia coast. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 35 (3): 333–357.
- Frey, R. W., Howard, J. D. 1990. Trace fossils and depositional sequences in a clastic shelf setting, Upper Cretaceous of Utah. *Journal of Paleontology*.
- Frey, R. W., Howard, J. D., Pryor, W. A. 1978. *Ophiomorpha*: Its morphologic, taxonomic, and environmental significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 23 (3): 199–229.
- Frey, R. W., Curran, H. A., Pemberton, S. G. 1984. Tracemaking Activities of Crabs and Their Environmental Significance: The Ichnogenus *Psilonichnus*. *Journal of Paleontology* 58 (2): 333–350.
- Frey, R. W., Pemberton, S. G., Saunders, T. D. A. 1990. Ichnofacies and bathymetry: a passive relationship. *Journal of Paleontology*, 64 (1): 155–158.
- Fu, S. 1991. Funktion, Verhalten und Einteilung fucoider und lophocteniider Lebensspuren. Title. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 64: 1–79.
- Fürsich, F. T. 1974. On *Diplocraterion* Torell 1870 and the significance of morphological features in vertical, spreiten-bearing, U-shaped trace fossils. *Journal of Paleontology*, 48 (5): 952–962.
- Fürsich, F. T. 1981. Invertebrate trace fossils from the Upper Jurassic of Portugal. *Comunicacoes Servicos Geologicos de Portugal*, 67: 53–168.
- Fürsich, F. T. 1995. Shell concentrations. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 88 (3): 643–655.
- Fürsich, F. T., Alberti, M., Pandey, D. K. 2013. Stratigraphy and palaeoenvironments of the Jurassic rocks of Kachchh. *Beringeria*, 7 (7): 174.
- Fürsich, F. T., Uchman, A., Alberti, M., Pandey, D. K. 2018. Trace fossils of an amalgamated storm-bed succession from the Jurassic of the Kachchh Basin, India: The significance of

- time-averaging in ichnology. *Journal of Palaeogeography*, 7 (1): 14–31.
- Gaillard, C., Racheboeuf, P. R. 2006. Trace Fossils From Nearshore To Offshore Environments: Lower Devonian of Bolivia. *Journal of Paleontology*, 80 (6): 1205–1226.
- Galloway, W. E. 2008. Depositional Evolution of the Gulf of Mexico Sedimentary Basin. Vol. 5. Elsevier.
- Galloway, W. E., Ganey-Curry, P. E., Li, X., Buffler, R. T. 2000. Cenozoic depositional history of the Gulf of Mexico basin. *AAPG Bulletin*, 84 (11): 1743–1774.
- García-Ramos, J. C. 1984. Estudio de las trazas fósiles (Icnofauna) del campo de Gibraltar (Provincia de Cádiz). *Magna* 7: 1–97.
- Gardner, J. A. 1945. Mollusca of the Tertiary formations of northeastern Mexico. *Geological Society of America Memoir*, 11:1-332.
- Garvie, C. L. 1996. The Molluscan Macrofauna of the Reklaw Formation, Marquez Member (Eocene: Lower Clairbornian), in Texas. *Bulletins of American Paleontology*, 111 (352): 1–177.
- Genise, J. F. 1995. Upper Cretaceous trace fossils in permineralized plant remains from Patagonia, Argentina. *Ichnos*, 3 (4): 287–299.
- Genise, J. F., Bown, T. M. 1994. New Miocene scarabeid and hymenopterous nests and early Miocene (Santacrucian) paleoenvironments, patagonian Argentina AU - Genise, Jorge F. *Ichnos*, 3 (2): 107–117.
- Gibert, de J. M. 1996. A New Decapod Burrow System from the NW Mediterranean Pliocene. *Revista Española de Paleontología*, 11 (2): 251–254.
- Gibert, de J. M., Martinell, J. 1998. El Modelo de Icnofacies, 30 años después. *Revista Española de Paleontología*, 13 (2): 167–174.
- Gibert, de J. M., Domènech, R. 2008. Trazas fósiles de nuculoideos (*Protovirgularia*) del Mioceno Marino de la Cuenca del Vallés-Penedés. *Revista Española de Paleontología* 23 (2): 129–138.
- Gibert, de J. M., Jeong, K., Martinell, J. 1999. Ethologic and ontogenic significance of the Pliocene trace fossil *Sinusichnus sinuosus* from the northwestern Mediterranean. *Lethaia* 32 (1): 31–40.
- Gibert, de J. M., Domènech, R., Martinell, J. 2004. An ethological framework for animal bioerosion trace fossils upon mineral substrates with proposal of a new class, Fixichnia. *Lethaia*, 37 (4): 429–437.
- Gibert, de J. M., Netto, R. G., Tognoli, F. M. W., Grangeiro, M. E. 2006. Commensal worm traces and possible juvenile thalassinidean burrows associated with *Ophiomorpha nodosa*, Pleistocene, southern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 230 (1–2): 70–84.

- Gingras, M. K., Pemberton, S. G., Smith, M. 2015. Bioturbation: reworking sediments for better or worse. *Oilfield Review*, 26 (4): 46–58.
- Gingras, M. K., Pemberton, S. G., Saunders, T., Clifton, H. E. 1999. The Ichnology of Modern and Pleistocene Brackish-Water Deposits at Willapa Bay, Washington: Variability in Estuarine Settings. *Palaos*, 14 (4): 352.
- Gingras, M. K., Dashtgard, S. E., MacEachern, J. A. Pemberton, S.G. 2008. Biology of shallow marine ichnology: A modern perspective. *Aquatic Biology* 2 (3): 255–268.
- Gingras, M. K., Bann, K. L., MacEachern, J. A., Waldron, J. W. F., Pemberton, S. G. 2006. A conceptual framework for the application of trace fossils. *In*: Giosan, L. y Bhattacharya, J. P. (eds.), Vol. 52, 1–25. SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- Goldhammer, R. K. 1999. Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico. Special Paper 340: Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico 1: 1–58.
- Goldring, R. 1964. Trace-Fossils and the Sedimentary Surface in Shallow-Water Marine Sediments. *In*: Straaten, V. (ed.), *Deltaic and Shallow Marine Deposits*, 1, 136–143. Elsevier, Groninga.
- González García, R., Holguin Quiñones, N. 1992. Las rocas generadoras de México. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 42: 16–30.
- Gray, G. G., Lawton, T. F., Murphy, J. J. 2008. Looking for the Mojave-Sonora megashear in northeastern Mexico. 09. *In*: Moore, G. (ed.), *The Geological Society of America Field Guide 14*, Field Guide.. The Geological Society of America, Houston. 27–38.
- Hall, J. 1847. *Paleontology of New York*. C. Van Benthuysen, Albany.
- Häntzschel, W. 1975. Trace fossils and problematica. *In*: Moore, R. C. (ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part W, Miscellanea, Supplement 1*, Geological Society of America and University of Kansas Press, Boulder, CO and Lawrence, Kansas, 1–269.
- Heaslip, W. G. 1968. Cenozoic evolution of the alticostate venericards in Gulf and East Coastal North America. *Palaeontographic Americana*, 6 (39): 55–135.
- Hernández-Mendoza, J. J., Hentz, T. F., DeAngelo, M. V., Wawrzyniec, T. F., Sakurai, S., Talukdar, S. C. y Holtz, M. H. 2008. Miocene chronostratigraphy, paleogeography, and play framework of the Burgos Basin, southern Gulf of Mexico. *AAPG Bulletin*, 92 (11): 1501–1535.
- Hertweck, G., Wehrmann, A. y Liebezeit, G. 2007. Bioturbation structures of polychaetes in modern shallow marine environments and their analogues to *Chondrites* group traces. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 245 (3–4): 382–389.
- Howard, J. D. y Frey, R. W. 1984. Characteristic trace fossils in nearshore to offshore sequences, Upper Cretaceous of east-central Utah. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21 (2): 200–219.

- Hudec, M. R., Norton, I. O., Jackson, M. P. A. y Peel, F. J. 2013. Jurassic evolution of the Gulf of Mexico salt basin. *AAPG Bulletin*, 97 (10): 1683–1710.
- Ivany, L. C., Wilkinson, B. H., Lohmann, K. C., Johnson, E. R., McElroy, B. J. y Cohen, G. J. 2004. Intra-Annual Isotopic Variation in Venericardia Bivalves: Implications for Early Eocene Temperature, Seasonality, and Salinity on the U.S. Gulf Coast. *Journal of Sedimentary Research*, 74 (1): 7–19.
- Johnson, H. D., Baldwin, C. T. 1996. Shallow clastic seas. En: Reading, H. G. (ed.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 232–277.
- Keighley, D. G., Pickerill, R. K. 1995. The ichnotaxa *Palaeophycus* and *Planolites*: Historical perspectives and recommendations. *Ichnos*, 30: 301–309.
- Kennedy, W. J. 1967. Burrows and surface traces from the Lower Chalk of southern England. *The Bulletin of the British Museum (Natural History)*, 15 (3): 125–167.
- Kidwell, S. M., Bosence, D. W. J. 1991. Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas. En: Allison, P. A. y Briggs, D. E. . (eds.), *Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record*, Plenum Press, New York, 115–209.
- Kidwell, S. M., Fürsich, F. T., Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossils concentrations. *Palaaios*, 1: 228–238.
- Kim, J. Y., Pickerill, R. K., Wilson, R. A. 2001. Lower Silurian Upsalquitch Formation of New Brunswick , eastern Canada, 131–137.
- Knaust, D. 2015. Siphonichnidae (new ichnofamily) attributed to the burrowing activity of bivalves: Ichnotaxonomy, behaviour and palaeoenvironmental implications. *Earth-Science Reviews*, 150: 497–519.
- Knaust, D. 2017. *Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation*. Springer, Dordrecht.
- Knaust, D., Thomas, R. D. K., Curran, H. A. 2018. *Skolithos linearis*, Haldeman, 1840 at its early Cambrian type locality, Chickies Rock, Pennsylvania: Analysis and designation of a neotype. *Earth-Science Reviews*, 185: 15–31.
- Krapovickas, V. 2010. El rol de las trazas fósiles de tetrápodos en los modelos de icnofacies en ambientes de climas áridos-semiáridos. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, 343 p.
- Lababdeira, C. C., Rodríguez-Tovar, F. J., Uchman, A. 2016. The End-Cretaceous Extinction and Ecosystem Change. *In*: Mángano, M. G. y Buatois, L. A. (eds.), *The Trace-Fossil Record of Major Evolutionary Events, Volume 2: Mesozoic and Cenozoic*, Springer, Dordrecht, 265–300.
- Leaman, M., McElroy, D. 2017. Three-Dimensional Morphological and Permeability Modelling of *Diplocraterion*. *Ichnos*, 24 (1): 51–63.

- Lowemark, L., Zheng, Y. C., Das, S., Yeh, C. P., Chen, T. T. 2016. A peculiar reworking of *Ophiomorpha* shafts in the Miocene Nangang Formation, Taiwan. *Geodinamica Acta*, 28 (1–2): 71–85.
- Luo, M., Gong, Y.-M., Shi, G. R., Chen, Z.-Q., Huang, J., Hu, S., Feng, X., Zhang, Q., Zhou, C., Wen, W. 2018. Palaeoecological Analysis of Trace Fossil *Sinusichnus sinuosus* from the Middle Triassic Guanling Formation in Southwestern China. *Journal of Earth Science*, 29 (4): 854–863.
- MacEachern, J. A., Gingras, M. K. 2007. Recognition of brackish-water trace fossil assemblages in the Cretaceous western interior seaway of Alberta. En: Bromley, R. G., Buatois, L. A., Mángano, M. G., Genise, J. F. y Melchor, R. N. (eds.), *Sediment-organism interactions, a multifaceted ichnology*, SEPM, Special Publication, 149–194.
- MacEachern, J. A., Bann, K. L., Bhattacharya, J. P., Howell, C. D. 2005. Ichnology of deltas: organism responses to the dynamic interplay of rivers, waves, storms and tides. En: *River Deltas-Concepts, Models and Examples*, 49–85.
- MacEachern, J. A., Bann, K. L., Pemberton, S. G., Gingras, M. K. 2007a. The ichnofacies paradigm: High-resolution paleoenvironmental interpretation of the rock record. *Applied ichnology*. SEPM Short Course Notes.
- MacEachern, J. A., Gingras, M. K., Bann, K. L., Dafoe, L. T., Pemberton, S. G. 2007b. Applications of ichnology to high-resolution genetic stratigraphic paradigms. *Applied ichnology*.
- MacEachern, J. A., Bann, K. L., Gingras, M. K., Zonneveld, J. P., Dashtgard, S. E. y Pemberton, S. G. 2012. The Ichnofacies Paradigm. En: Knaust, D. y Bromley, R. G. (eds.), *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments*, Elsevier, China, 103–138.
- Mángano, M. G., Buatois, L. G. 2004. Reconstructing early Phanerozoic intertidal ecosystems: Ichnology of the Cambrian Campanario Formation in northwest Argentina. En: Webby, B. D., Buatois, L. A. y Mángano, M. G. (eds.), *Trace fossils in Evolutionary Palaeoecology*, 17–38. *Fossils and Strata*.
- Mángano, M. G., Buatois, L. A., West, R. R., Maples, C. G. 1998. Contrasting Behavioral and Feeding Strategies Recorded by Tidal-Flat Bivalve Trace Fossils from the Upper Carboniferous of Eastern Kansas. *Palaos*, 13 (4): 335.
- Maples, C. G. y West, R. R. 1989. *Lockeia*, not *Pelecypodichnus*. *Journal of Paleontology*, 63 (5): 694–696.
- Marshall, P. 2003. Ichnofossils of the *Psilonichnus* Ichnofacies and Their Paleoeological and Paleoenvironmental Significance in the Scottish Middle Jurassic. *Ichnos*, 9 (3–4): 95–108.
- Martinsson, A. 1970. Toponymy of Trace Fossils. En: Crimes, T. P. y Harper, J. C. (eds.), *Trace Fossils*, Geological Society, London, Special Issue 3: 323–330.
- McClure, K. J. y Lockwood, R. 2015. Relationships among *Venericardia* (Bivalvia: *Carditidae*) on the U.S. Coastal Plain during the Paleogene. *Journal of Paleontology* 89 (3): 522–531.

- McKerrow, W. S. 1978. *The Ecology of Fossils: An Illustrate Guide*. Duckworth, London.
- Minter, N. J., Buatois, L. A., Mángano, M. G. 2016. The Conceptual and Methodological Tools of Ichnology. En: Mángano, M. G. y Buatois, L. A. (eds.), *The Trace-Fossil Record of Major Evolutionary Events*. Topics in Geobiology, Springer, Dordrecht., 1–26.
- Monaco, P. 1995. Relationships between trace-fossil communities and substrate characteristics in some Jurassic pelagic deposits in the Umbria-Marche basin, Central Italy. *Geobios* 28: 299–311.
- Monaco, P. y Checconi, A. 2008. Stratigraphic indications by trace fossils in Eocene to Miocene turbidites and hemipelagites of the Northern Apennines (Italy). *Acta Geologica* 83 (September 2016): 133–163.
- Montalvo-Arrieta, J. C., Pérez-Campos, X., Ramos-Zuñiga, L. G., Paz-Martínez, E. G., Salinas-Jasso, J. A., Navarro de León, I., Ramírez-Fernández, J. A. 2018. El Cuchillo Seismic Sequence of October 2013–July 2014 in the Burgos Basin, Northeastern Mexico: Hydraulic Fracturing or Reservoir-Induced Seismicity? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108 (5): 3092–3106.
- Myrow, P. M. 1995. *Thalassinoides* and the Enigma of Early Paleozoic Open-Framework Burrow Systems. *Palaaios*, 10 (1): 58.
- Nara, M. 1995. *Rosselia socialis*: a dwelling structure of a probable terebellid polychaete. *Lethaia*, 28 (2): 171–178.
- Nara, M. 2002. Crowded *Rosselia socialis* in Pleistocene Inner Shelf Deposits: Benthic Paleoecology During Rapid Sea-level Rise. *Palaaios*, 17 (3): 268–276.
- Navarro-de León, I., de León-Gómez, H., Werner-Paulus, J. H., Pola-Simuta-Cosme. 1999. Impacto de las discontinuidades litológicas y estructurales en La Presa el Cuchillo Solidaridad, China, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 16 (2): 121–131.
- Nesbitt, E. A. y Campbell, K. A. 2006. The Paleoenvironmental Significance of *Psilonichnus*. *Palaaios*, 21 (2): 187–196.
- Netto, R. y Grangeiro, M. 2010. Neoichnology of the seaward side of Peixe Lagoon in Mostardas, southernmost Brazil: The *Psilonichnus* ichnocoenosis revisited. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 12 (3): 211–224.
- Netto, R. G. 2007. *Skolithos*-Dominated Piperock in Nonmarine Environments: An Example from the Triassic Caturrita Formation, Southern Brazil. En: *Sediment-organism interactions: A multifaceted ichnology*.
- Nicholson, H. A. 1893. Contribution to the study of errant annelids of the Older Paleozoic rocks. *Proceedings of the Royal Society of London*, 21: 288–290.
- Olivero, D. 2003. Early Jurassic to Late Cretaceous evolution of *Zoophycos* in the French Subalpine Basin (southeastern France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology,*

- Palaeoecology, 192 (1–4): 59–78.
- Olivero, D., Gaillard, C. 1996. Paleoecology of Jurassic *Zoophycos* from south-eastern France. *Ichnos*, 4 (4): 249–260.
- Ortiz-Ubilla, A. 2006. Evolución geológica-estructural de la Región Arcarabuz-Culebra, Oeste de la Cuenca de Burgos, Noreste de México. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 137 pp.
- Ortiz-Ubilla, A., Tolson, G. 2004. Interpretación estructural de una sección sísmica en la región Arcabuz-Culebra de la Cuenca de Burgos, NE de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21 (2): 226–235.
- Palma, R. M., Lanés, S. G. 2001. Shell bed stacking patterns in the Chachao formation (Early Valanginian) in Malargüe area, Mendoza Province, Neuquen Basin-Argentina. *Carbonates and Evaporites*, 16 (2): 168–180.
- Paranjape, A. R., Kulkarni, K. G. y Gurav, S. S. 2013. Significance of *Lockeia* and associated trace fossils from the Bada Bagh Member, Jaisalmer Formation, Rajasthan. *Journal of Earth System Science*, 122 (5): 1359–1371.
- Pemberton, S. G. 2003. Biogenic Sedimentary Structures. En: Middleton, G. V. (ed.), *Sedimentology. Encyclopedia of Earth Science*, Springer Netherlands, Dordrecht, 117–127.
- Pemberton, S. G., Frey, R. W. 1982. Trace Fossil Nomenclature and the *Planolites-Planolites* Dilemma. *Journal of Paleontology*, 56 (4): 843–881.
- Pemberton, S. G., Frey, R. W. 1984. Ichnology of Storm-Influenced Shallow Marine Sequence: Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta. En: Stott, D. F. y Glass, D. J. (eds.), *The Mesozoic of Middle North America: A Selection of Papers from the Symposium on the Mesozoic of Middle North America*, Calgary, Alberta, Canada, Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, 281–304.
- Pemberton, S. G., Wightman, D. M. 1992. Ichnological characteristics of brackish water deposits. In: Pemberton, S. G. (ed.), *Applications of Ichnology to Petroleum Exploration, A Core Workshop*, SEPM Core Workshop, 17.141–167.
- Pemberton, S. G., MacEachern, J. A., Gingras, M. K. 2007. The Antecedents of Invertebrate Ichnology in North America: The Canadian and Cincinnati Schools. *Trace Fossils* (1): 14–31.
- Pemberton, S. G., Maceachern, J. A., Gingras, M. K., Zhang, J. 2000. Significance of ichnofossils to genetic stratigraphy. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 43 (5): 541–560.
- Pemberton, S. G., MacEachern, J. A., Dashtgard, S. E., Bann, K. L., Gingras, M. K., Zonneveld, J. P. 2012. Shorefaces. En: Knaust, D. y Bromley, R. G. (eds.), *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments*, Elsevier, Amsterdam, 64: 563–603.
- PEMEX. 2000. Reporte Estudio de los Plays Eoceno Wilcox-Queen City: 120 p.

- Penrose, J. R. 1889. Preliminar report on the Geology of the Gulf Tertiary of the Texas. En: Dumble, F. G. S. A. (ed.), First annual Report of the geological survey of Texas, State Printing Office, Austin, Texas, 5–101.
- PEP. 2013. Provincia Petrolera Burgos. Reynosa, Tamaulipas, .
- Pérez-Cruz, G. A. 1992. Geologic evolution of the Burgos Basin, northeastern Mexico. Tesis doctoral, Rice University, Houston, Texas, 155 pp.
- Perrilliat, M. C. 1963. Moluscos del Terciario Inferior del Noreste de México. *Paleontología Mexicana*, 19:26.
- Pollard, J. E., Goldring, R., Buck, S. G. 1993. Ichnofabrics containing *Ophiomorpha*: significance in shallow-water facies interpretation. *Journal of the Geological Society* 150 (1): 149–164.
- Reolid, J., Betzler, C. 2019. The ichnology of carbonate drifts. *Sedimentology*, 66 (4): 1427–1448.
- Rindsberg, A. K. 2012. *Ichnotaxonomy : Finding Patterns in a Welter of Information*. Elsevier, 64.
- Rindsberg, A. K. 2018. Ichnotaxonomy as a Science. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 88: 67–86.
- Rindsberg, A. K., Kopaska-Merkel, D. C. 2005. *Trepichnus* and *Arenicolites* from the Steven C. Minkin Paleozoic Footprint Site (Langsettian, Alabama, USA). 1. En: Buta, R. ., Rindsberg, A. K. y Kopaska-Merkel, D. C. (eds.), *Pennsylvanian footprints in the Black Warrior basin of Alabama*, Alabama Paleontological Society, Alabama, 121–141.
- Rodríguez-Lozano, D. 1976. Bioestratigrafía de la franja Paleoceno–Eoceno de la Cuenca de Burgos. III Simposium de Geología de subsuelo, Zona Noreste: 241–253.
- Sakakura, N. 2002. Taphonomy of the bivalve assemblages in the upper part of the Paleogene Ashiya Group, southwestern Japan. *Paleontological Research*, 6 (1): 101–120.
- Schlirf, M., Uchman, A. 2005. Revision of the ichnogenus *Sabellarifex* Richter, 1921 and its relationship to *Skolithos* Haldeman, 1840 and *Polykladichnus* Fürsich, 1981. *Journal of Systematic Palaeontology*, 3 (2): 115–131.
- Schlirf, M., Uchman, A., Kümmel, M. 2001. Upper Triassic (Keuper) non-marine trace fossils from the Haßberge area (Franconia, south-eastern Germany). *Paläontologische Zeitschrift*, 75 (1): 71–96.
- Seilacher, A. 1953. Studien zur palichnologie. I. Über die methoden der palichnologie. *Neues Jahrbuch der Geologie und Palaontologie*.
- Seilacher, A. 1964. Sedimentological Classification and nomenclature of Trace Fossil. *Sedimentology*, 3: 253–256.
- Seilacher, A. 1967. Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5 (5): 413–428.

- Seilacher, A. 1978. Use of trace fossil assemblages for recognizing depositional environments. En: Basan, P. B. (ed.), Trace fossils concepts, 167–181. SEPM, Short Courses, Oklahoma.
- Seilacher, A. 2007. Trace Fossil Analysis. Springer Verlag, Heilderberg, Alemania.
- Seilacher, A. , Seilacher, E. 1994. Bivalvia trace fossils: A lesson from actuopaleontology. : 5–15.
- Sessa, J. A., Ivany, L. C., Schlossnagle, T. H., Samson, S. D., Schellenberg, S. A. 2012. The fidelity of oxygen and strontium isotope values from shallow shelf settings: Implications for temperature and age reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 342–343: 27–39.
- Steward, R. B. 1930. Gabb's California Cretaceous and Tertiary Type Lamellibranchs. The Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Philadelphia.
- Taylor, A. M., Goldring, R. 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *Journal of the Geological Society*, 150 (1): 141–148.
- Temelkov, B., Andrew, T. 2005. Recent bivalve ecology applied to the reconstruction of paleocommunities. *Proceedings of the Balkan Scientific Conference of Biology in Plovdiv (Bulgaria)*: 436–442.
- Torell, O. 1870. Petrificata Suecana formationis Cambricae. *Lunds University Arsskrift*, 6: 1–14.
- Uchman, A. 1999. Ichnology of the Rhenodanubian Flysch (Lower Cretaceous-Eocene) in Austria and Germany. *Beringeria*, 25: 67–173.
- Uchman, A. 2009. The *Ophiomorpha rudis* ichnosubfacies of the *Nereites* ichnofacies: Characteristics and constraints. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 276 (1–4): 107–119.
- Uchman, A., Mikuláš, R., Houša, V. 2003. The trace fossil *Chondrites* in Uppermost Jurassic-Lower Cretaceous deep cavity fills from the Western Carpathians (Czech Republic). *Geologica Carpathica*, 54 (3): 181–187.
- Uribe-Cifuentes, R. M., Mercado-Herrera, V., Méndez de León, J., Guerrero R., A. 2004. Modelado Geológico e Inversión Elástica en el Play Midway, Cuenca de Burgos. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 51 (2): 32–37.
- Vallon, L. H., Rindsberg, A. K., Bromley, R. G. 2016. An updated classification of animal behaviour preserved in substrates. *Geodinamica Acta*, 28 (1–2): 5–20.
- Vega, F. J., Perrilliat, M. D. C. 1989. On a New Species of *Venericardia* From the Lower Eocene in Northeastern Mexico (Difunta Group). *Tulane Studies in Geology and Paleontology*, 22 (3): 101–106.
- Vossler, S. M., Pemberton, S. G. 1989. Ichnology and paleoecology of offshore siliciclastic deposits in the Cardium Formation (Turonian, Alberta, Canada). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 74 (3–4): 217–239.

- Wendlandt, E. A., Knebel, G. M. 1929. Lower Claiborne of East Texas, with special reference to Mount Sylvan dome and salt movements. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 13: 1351–1355.
- Wilmsen, M. 2012. Origin and Significance of Late Cretaceous Bioevents: Examples from the Cenomanian. Acta Palaeontologica Polonica, 57 (4): 759–771.
- Yanin, B. T., Baraboshkin, E. Y. 2013. *Thalassinoides* burrows (decapoda dwelling structures) in lower Cretaceous sections of southwestern and central Crimea. Stratigraphy and Geological Correlation, 21 (3): 280–290.
- Zarra, L. 2007. Chronostratigraphic Framework for the Wilcox Formation (Upper Paleocene–Lower Eocene) in the Deep-Water Gulf of Mexico: Biostratigraphy, Sequences, and Depositional System. The Paleogene of the Gulf of Mexico and Caribbean Basins, 2: 81–145.
- Zhang, J., Rossi, V. M., Peng, Y., Steel, R., Ambrose, W. 2019. Revisiting Late Paleocene Lower Wilcox deltas, Gulf of Mexico: River-dominated or mixed-process deltas?. Sedimentary Geology, 389: 1–12.

APÉNDICE 1. MARCO TEORICO DE LAS TRAZAS FÓSILES

La icnología es una ciencia multidisciplinaria que se enfoca en el estudio de trazas producidas por la actividad de organismos dentro de un sustrato y que han sido preservadas en el registro estratigráfico (Pemberton y Wightman 1992; Buatois y Mángano 2011; Knaust 2017).

La amplia gama de estructuras biogénicas incluye estructuras de origen orgánico; dentro del campo de la icnología la bioturbación y bioerosión son las más importantes, dejando fuera a estructuras de bioestratificación como tapetes microbianos, sin embargo, también se han considerado como una forma de icnofósiles de forma microscópica (Chacón, 2010).

La icnología como disciplina científica moderna surge a partir de establecimiento del denominado “Modelo de Icnofacies” (Seilacher, 1967), el cual ha proporcionado las herramientas teóricas y metodológicas para el análisis de asociaciones de las trazas fósiles, enfatizando su utilidad en reconstrucciones paleoambientales (Buatois y Mángano, 2008).

Características de las trazas fósiles.

Las trazas fósiles se han reconocido por su doble naturaleza: tanto como objetos biológicos como sedimentológicos (Pemberton *et al.*, 2000) por lo que, como disciplina, la icnología resulta ser muy importante para la paleontología y la geología sedimentaria, colocándolos en un punto de intersección entre la biología y la geología. Las trazas fósiles pueden ser una poderosa herramienta en estudios de análisis de facies, incluyendo reconstrucciones paleoambientales, dinámica sedimentarias, ya que en ellos se quedan registrados parámetros que son sensibles al depósito ambiental (Pemberton 2003; MacEachern *et al.* 2005).

Existen factores ambientales que pueden ser revelados por los icnofósiles como la salinidad del medio, los niveles de oxígeno, la energía, la interacción con otros organismos y el suministro de alimento. Además, la icnología puede aportar información paleobiológica a detalle; algunas trazas fósiles registran casi fotográficamente la anatomía del organismo productor, llegando a dar pistas certeras acerca del organismo involucrado (Buatois y Mángano 2011). En la Tabla 6 se resumen sus características principales.

Tabla 6. Principales características de las trazas fósiles (Buatois y Mángano 2008, 2011; Minter *et al.* 2016).

CARACTERÍSTICAS	PARTICULARIDADES
Las trazas fósiles representan evidencia de comportamiento.	La morfología y el patrón arquitectural de los icnofósiles proporcionan información única sobre la anatomía y la etología de los organismos productores.
Un organismo puede producir más de un icnotaxón.	Diferentes conductas pueden ser atribuidas a un solo animal. Por lo tanto, un solo organismo puede ser responsable de la producción de varios icnogéneros o icnoespecies.
Un icnotaxón se puede producir por más de un organismo.	No siempre hay relación entre el organismo productor y la traza realizada, revelando convergencia del comportamiento. En algunas ocasiones, no es posible establecer una relación de un productor con el icnotaxón.
Varios organismos pueden producir una traza.	Una sola traza puede reflejar el comportamiento de más de un productor, que se generaron más o menos al mismo tiempo o en eventos sucesivos de bioturbación.
Las trazas fósiles raramente sufren transporte.	Representan el registro <i>in situ</i> de la actividad biogénica. Casi invariablemente, no han sufrido desplazamiento secundario y tienen un vínculo más íntimo con el sustrato que los alberga. Esta característica es uno de los puntos fuertes en reconstrucciones

Clasificaciones

La clasificación de las trazas fósiles ha sido un tema controversial a lo largo del desarrollo de la icnología, la falta de un sistema uniforme para la clasificación dificulta el estudio integrado de sus características sedimentológicas, ambientales y morfológicas. Se han desarrollado diferentes clasificaciones, la cuales se describen a continuación:

Clasificación preservacional. Seilacher (1964) y Martinsson (1970) propusieron dos clasificaciones las cuales se basan en la relación entre la traza y el sustrato, refiriéndose a la preservación y a la génesis (Figura 55).

La clasificación de Seilacher (1964) se basa en dos términos: descriptivos y genéticos. Los descriptivos se asocian con semirrelieves, relieves completos, hiporrelieves y epirrelieves, mientras que en la clasificación de Martinsson (1970) se interpretan los procesos de interacción entre los organismos y el sustrato, incluye cuatro categorías: Epichnia, Hipichnia, Endichnia, Exichnia.

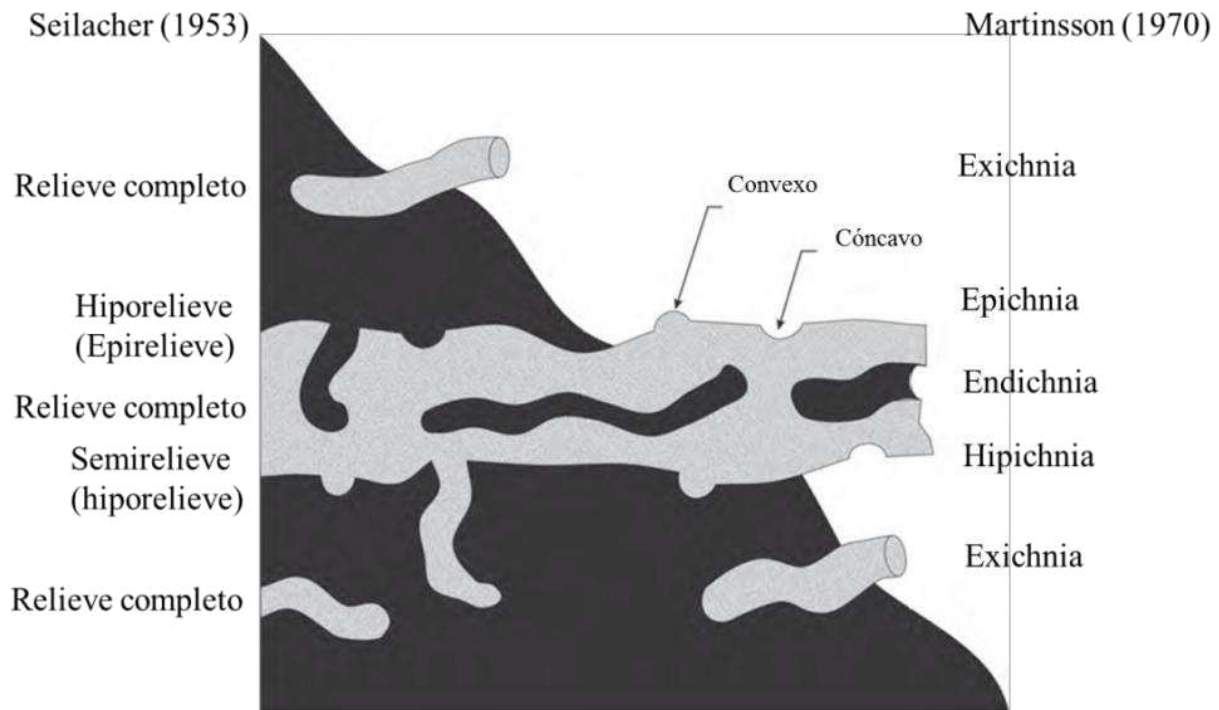


Figura 55. Toponimia de las trazas fósiles, esquema realizado a partir de Seilacher (1953) y Martinsson (1970). Tomado Rindsberg (2012).

Clasificación etológica. Propuesta por Seilacher (1953) y redefinida por Frey y Seilacher (1980), es de las más utilizadas dentro del marco conceptual de la icnología, y es una clasificación base para análisis de tipo paleoecológico en reconstrucciones antiguas usando trazas fósiles (Vallon *et al.* 2016).

Originalmente Seilacher (1953) propuso cinco categorías basadas en el comportamiento de invertebrados marinos: *Dominichnia* (trazas de comportamiento), *Cubichnia* (trazas de descanso), *Repichnia* (trazas de desplazamiento o locomoción), *Pasichnia* (trazas de alimentación o pastoreo) y *Fodinichnia* (trazas de alimentación producidas por organismos infaunales y semisésiles).

En los últimos años se han adicionado otras categorías no solo para trazas de organismos marinos, sino también de ambientes continentales: *Fugichnia*, estructuras de escape (Frey *et al.* 1984a); *Agrichnia*, sistemas de cultivo y trampas (Ekdale *et al.* 1984); *Praedichnia*, trazas de perforación (Ekdale 1985); *Equilibrichnia*, trazas de equilibrio (Bromley 1996); *Calichnia*, trazas de nidificación (Genise y Bown 1994); *Aedifichnia*, trazas de edificación (Bown y Ratcliffe 1988); *Xylichnia*, estructuras de perforaciones de madera (Genise 1995) como una subcategoría de *Fodinichnia* y *Fixichnia*, estructuras de fijación a sustratos duros (de Gibert *et al.* 2004) (Figura 56).

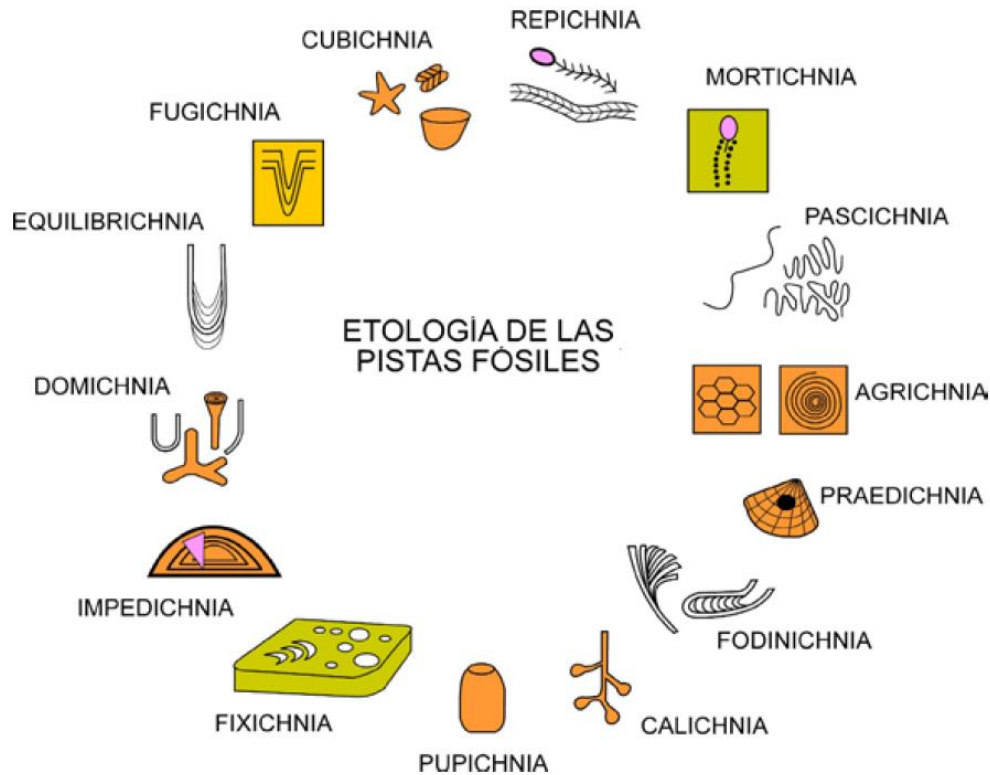


Figura 56. Categorías etológicas de las trazas fósiles. Tomado de Buatois y Mángano, 2011.

Icnofacies

El modelo de icnofacies fue propuesto por Dolf Seilacher de 1950 a 1960, en principio solo enfocado a ambientes marinos y basado en observaciones empíricas de asociaciones recurrentes de trazas fósiles acoplados con los parámetros que controlan la distribución de las trazas marinas, las cuales tienden a cambiar con el incremento de la distancia de la línea de costa hacia el medio marino (Frey *et al.*, 1990; Buatois y Mángano, 2008; MacEachern *et al.*, 2012). Esto provocó que erróneamente se considerara a los icnofósiles como indicadores de batimetría, siendo ésta sólo un aspecto secundario en el reconocimiento de las icnofacies (MacEachern *et al.*, 2012).

Como definición, una icnofacies consiste en una asociación de trazas fósiles que aparece recurrentemente a lo largo del tiempo geológico y que se relaciona comúnmente con determinados parámetros ambientales. El análisis de icnofacies involucra el estudio de todas las características relevantes de las asociaciones de trazas fósiles como la preservación, la etología y

el grupo trófico, más que la realización de un listado icnoespecífico (Krapovickas 2010). Las principales icnofacies se resumen en la Figura 57 y en la Tabla 7.

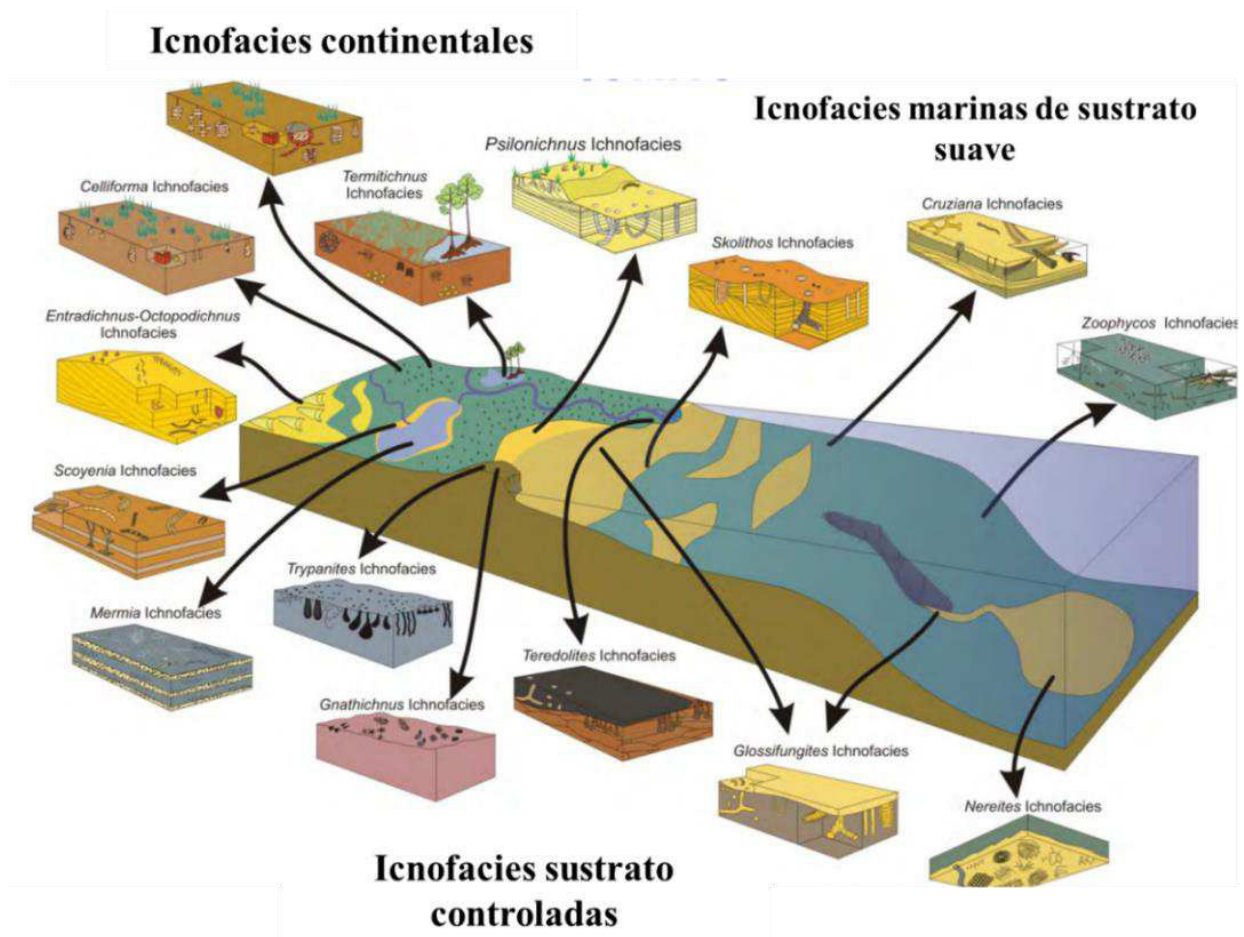


Figura 57. Esquema ilustrativo de las principales icnofacies de invertebrados. Las icnofacies individuales indican las condiciones y el ambiente de depósito. Modificado de Buatois y Mángano, 2011.

Tabla 7. Clasificación de Icnofacies y las condiciones paleoambientales en las que se forman cada una de ellas.

ICNOFACIES	CARACTERÍSTICAS
ICNOFACIES MARINAS DE SUSTRATO BLANDO	
<i>Psilonichnus</i> (Frey y Pemberton, 1987)	Ambientes marginales marinos en condiciones supralitorales, incluyendo zonas de backshore, dunas litorales y llanuras supramareales. Los elementos más comunes son madrigueras de habitación de cangrejos, que pueden estar asociadas a madrigueras y rastros de insectos y vertebrados.
<i>Skolithos</i> (Seilacher, 1964)	Corresponde a medios de depósito de energía hidrodinámica elevada, habitualmente con fenómenos erosivos frecuentes. Esta icnofacies es típica de ambientes arenosos, como zonas litorales y sublitorales de playas, barras arenosas o frentes deltáicos, aunque son típicamente de ambientes marinos someros (Frey <i>et al.</i> , 1990).
<i>Cruziana</i> (Seilacher, 1964)	Fue originalmente definida para plataforma somera, entre el nivel de oleaje normal y el nivel de oleaje de tormenta, pero se ha reconocido en ambientes someros de energía baja a moderada como lagunas costeras y estuarios.
<i>Zoophycos</i> (Seilacher, 1964)	Caracterizada por depósitos de grano fino, en general completamente bioturbado. Corresponde a medios de elevada estabilidad, baja energía y baja tasa de sedimentación. Este tipo de icnofacies aparece en un amplio intervalo de profundidad. Dominan las estructuras de locomoción y alimentación, las trazas suelen ser horizontales o ligeramente inclinadas.
<i>Nereites</i> (Seilacher, 1964)	Se constituye por <i>Pasichnia</i> y <i>Agrichnia</i> , aparece en la base de niveles turbidíticos. Los ambientes en donde se puede desarrollar son de aguas mayormente tranquilas pero oxigenadas, batiales o abisales.

ICNOFACIES MARINAS EN SUSTRATO FIRME

<i>Glossifungites</i> (Seilacher, 1967b; Pemberton y Frey, 1985)	Caracterizada por establecerse en sustratos firmes, pero no litificados y está compuesta por trazas de habitación que generalmente muestran marcas de excavaciones en sus paredes conservadas, debido al carácter firme del sustrato. Esta icnofacies generalmente se encuentra en medios intermareales a submareales (Pemberton y Frey, 1985), pero no tiene ninguna restricción batimétrica y ha sido descrita en depósitos batiales.
-------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ICNOFACIES MARINAS EN SUSTRATO DURO

<i>Trypanites</i> (Frey y Seilacher, 1980)	Se compone de tubos cilíndricos de organismos suspensívoros y también incluye raspaduras y mordeduras de organismos sobre el sustrato. Se usa para caracterizar sustratos duros y rocosos con perforaciones de algunos organismos como esponjas, bivalvos y gusanos. La diversidad es baja y en general, las perforaciones son producidas por litófagos, en cavidades perpendiculares al sustrato. Se utiliza para el registro del Paleozoico (Gibert y Martinell, 1998).
<i>Entobia</i> (Bromley y Asgaard, 1993)	Se caracteriza por perforaciones de habitación profunda, las estructuras más superficiales son en general eliminadas por erosión. Esta icnofacies, se caracteriza por desarrollarse en costas rocosas, y posiblemente se puede extender a otros medios como arrecifes (Perry, 1996) o hardgrounds de agua someras.
<i>Gnaticnus</i> (Bromley y Asgaard, 1993)	Icnofacies caracterizada por el dominio de estructuras superficiales, tales como pasichnia, marcas de incrustación y estructuras de habitación subsuperficiales. Esta icnofacies representa cortos episodios de perforación, seguidos de rápido enterramiento, en general en medios tranquilos.

ICNOFACIES MARINAS EN SUSTRATO VEGETAL

<i>Teredolites</i> (Bromley et al., 1984)	Se designa a asociaciones de trazas fósiles en troncos y fragmentos de madera en ambientes marinos someros y litorales.
--------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ICNOFACIES CONTINENTALES

<i>Termitichnus</i> (Smith <i>et al.</i>, 1993)	Corresponde a ambientes terrestres (no subacuáticos) e incluye asociaciones dominadas por galerías de habitación asociadas a estructuras de alimentación, constituida por trazas de vertebrados, invertebrados y plantas. Esta icnofacies puede caracterizar paleosuelos, llanuras aluviales desecadas, barras fluviales abandonadas, llanuras costeras y áreas marginales de campos de dunas (Buatois y Mángano, 1995).
<i>Scoyenia</i> (Buatois y Mángano, 1995, 1998)	ICnofacies que corresponde a ambientes húmedos con periodos subacuáticos y subaéreos, como llanuras de inundación, lagos efímeros y lacustres o áreas marginales de lagos. Las asociaciones son poco diversas y están dominadas por estructuras horizontales meniscadas.
<i>Mermia</i> (Buatois y Mángano, 1995, 1998)	Corresponde a medios continentales permanentemente subacuáticos (ambientes lacustres). Los productores de estas trazas son muy variados, incluyendo principalmente nemátodos, anélidos, artrópodos, moluscos y peces, las asociaciones pueden presentar una diversidad moderada o alta.
<i>Coprinisphaera</i> (Genise <i>et al.</i>, 2000)	Asociación de trazas fósiles en paleosuelos: representativa de ambientes dominados por vegetación herbácea e involucrando una amplia variedad de climas: climas secos y fríos, hasta húmedos y templados. Esta icnofacies comprende una mezcla de estructuras de invertebrados, vertebrados y plantas (Krapovickas, 2010).

La etología de los organismos y sus estructuras biogénicas resultantes son controladas principalmente por factores que incluyen la consistencia del sustrato, el tamaño del sedimento, condiciones de energía del medio, disponibilidad de nutrientes, turbidez del agua, salinidad, tasas de depósito, oxigenación y temperatura (MacEachern *et al.* 2007a), elementos importantes para el reconocimiento de una icnofacies. Las icnofacies proveen el primer paso lógico en la interpretación de un ambiente de depósito y constituyen un componente crucial en el análisis del comportamiento de la diversidad infaunal en los ambientes (MacEachern *et al.* 2012).

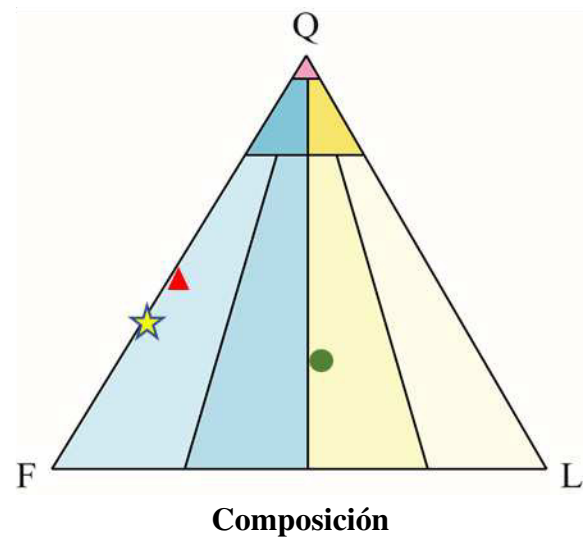
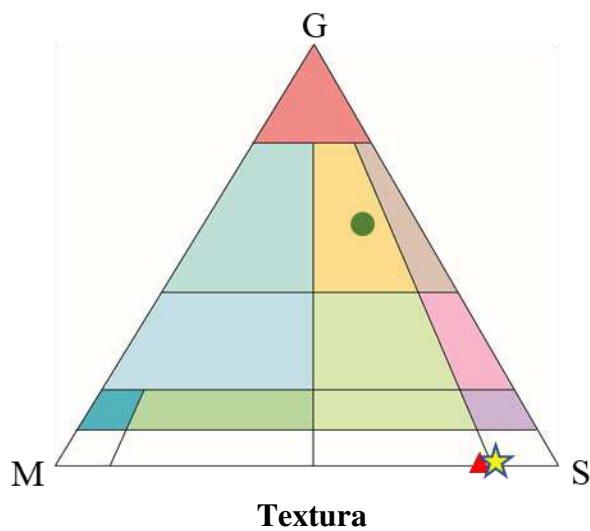
APÉNDICE 2. ANÁLISIS COMPOSICIONAL DE LAS ARENISCAS

LOCALIDAD EL REBAJE

		MUESTRA					
		R3 ▲		LR1 ★		MD ●	
Componentes principales	Cuarzo	138	46.0	103	34.3	76	25.3
	Feldspatos (K/Pg)	157	52.3	192	64.0	99	33.0
	Líticos	5	1.6	5	1.6	125	41.6
Minerales accesorios	Glauconita	13		5		125	
	Micas	28		23		56	
	Circones	0		1		2	

Clasificación textural	Arenisca fangosa (ms)	Arenisca (S)	Arenisca conglomeratica fangosa (msG)
Clasificación composicional	Feldespatarenita	Feldespatarenita	Feldespatolitoarenita

Diagramas de clasificación (*sensu* Folk *et al.*, 1970).

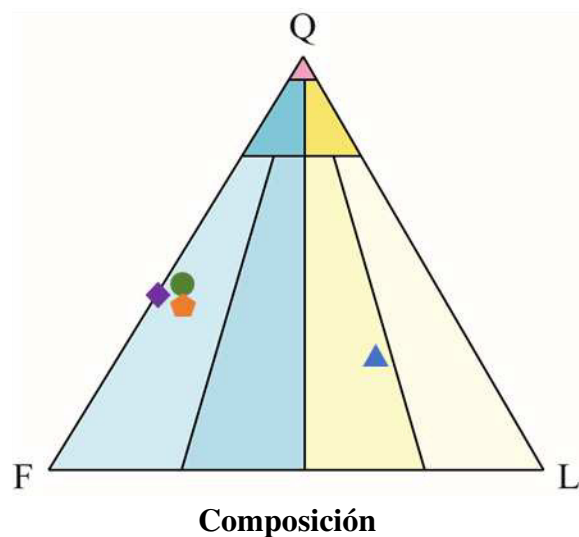
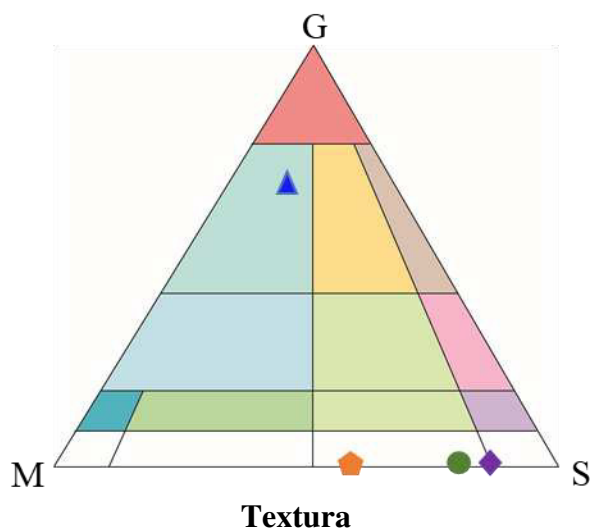


LOCALIDAD SAN JOSÉ DE LAS LAJAS

		MUESTRA							
		SJL-5 ◆		SJ1 ●		SJL-1 ▲		R6 ◆	
Componentes principales	Cuarzo	125	41.6%	129	43.0%	82	27.3%	127	42.3%
	Feldespatos (K/Pg)	171	57.0%	161	53.6%	60	20.0%	171	57%
	Líticos	4	1.3%	10	3.3%	158	52.6%	4	0.66%
Minerales accesorios	Glauconita	4		16		71		0	
	Micas	28		26		1		17	
	Circones	0		0		0		2	

Clasificación textural	Arenisca fangosa (mS)	Arenisca fangosa (mS)	Grava fangosa (Gm)	Arenisca (S)
Clasificación composicional	Feldespatarenita	Feldespatarenita	Feldespatolitorarenita	Feldespatarenita

Diagramas de clasificación (Folk *et al.*, 1970).

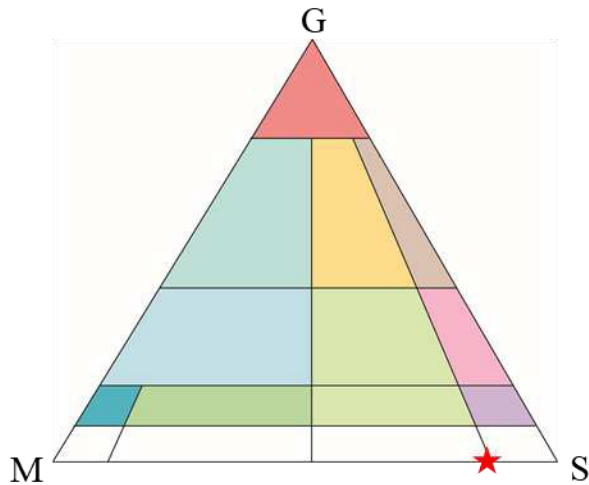


LA CURVA

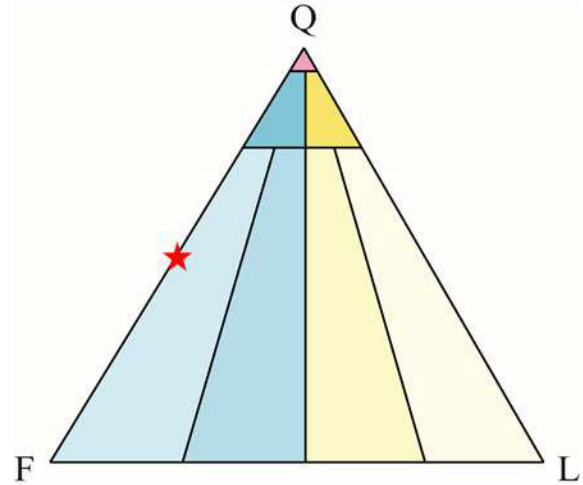
		MUESTRA	
		LC ★	
Componentes principales	Cuarzo	155	51.6%
	Feldespatos (K/Pg)	137	45.6%
	Líticos	8	2.6%
Minerales accesorios	Glauconita	3	
	Micas	16	
	Circones	3	

Clasificación textural	Arenisca (S)
Clasificación composicional	Feldespatoarenita

Diagramas de clasificación (Folk *et al.*, 1970).



Textura



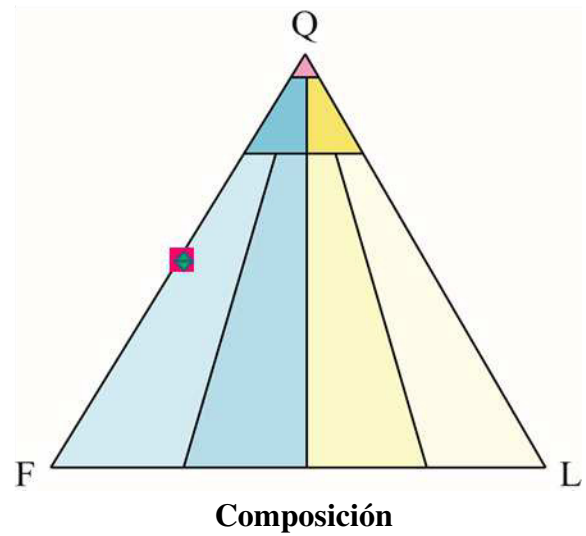
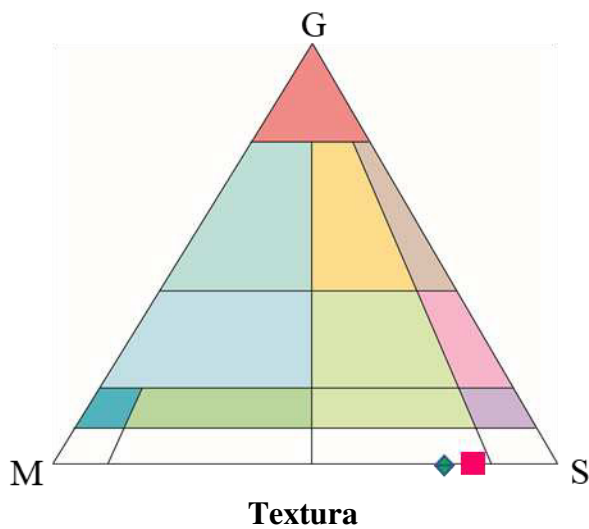
Composición

LOCALIDAD LA PRESA

		MUESTRA			
		BG 1 ■		BG 2 ◆	
Componentes principales	Cuarzo	151	50.3%	125	41.6
	Feldespatos (K/Pg)	145	48.3%	169	56.3
	Líticos	4	1.3%	6	2
Minerales accesorios	Glaucionita	18		13	
	Micas	1		5	
	Circones	1		2	

Clasificación textural	Arenisca fangosa (mS)	Feldespatarenita
Clasificación composicional	Arenisca fangosa (mS)	Feldespatarenita

Diagramas de clasificación (Folk *et al.*, 1970).



ANEXO 3. ARTÍCULO REQUISITO.

